

발간등록번호

11-1543000-001006-01

농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발

Development of a Rural Water Resources Assessment Tool

서울대학교

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2015 년 8 월 9 일

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 강 문 성

연 구 원 : 송 인 홍

연 구 원 : 송 정 헌

연 구 원 : 박 지 훈

연 구 원 : 전 상 민

연 구 원 : 김 계 응

연 구 원 : 류 정 훈

협동연구기관명 : 한국농어촌공사

협동연구책임자 : 김 진 택

연 구 원 : 문 성 근

협동연구기관명 : (주)부 린

협동연구책임자 : 유 환 성

연 구 원 : 기 우 석

요 약 문

I. 제 목

농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발

II. 연구성과 목표 대비 실적

1. 정량적 성과 목표 대비 실적

본 과업에서는 특히 2건을 출원하였고, 현재 등록을 위한 심사 중이다. 논문은 SCI 3편 게재확정, KCI 7편을 게재하여 정량적 성과 목표를 달성하였다. 기술거래는 특히가 등록 되는대로 실시할 예정이다. 정책제안 2건을 통해 정책활용 실적을 달성하였고, 학술지 기사 2편을 게재하여 홍보전시 실적을 모두 달성하였다. 이외에 연구계획서 상 목표에 설정되지 않았으나, 학술발표 13 편, 인력 양성 6명, 그리고 단행본 발간 및 논문상 수상 등 기타실적 2건이 본 연구과제를 통해 달성되었다.

구 분	특허		논문		학술 발표	기술 거래	사업 화	기술 인증	인력 양성	정책 활용	홍보 전시	기타
	출원	등록	SCI	비 SCI								
최종목표			2	6		1				2	2	
1차	목표			1								
년도	실적			1	5			1				1
2차	목표	1	1	1	2							
년도	실적	1	1건심사중		2	5			3		1	
3차	목표	1	1	1	3							
년도	실적	1	1건심사중	2 + 2편심사중	4 + 1편심사중	3			2	2	1	1
소 계	목표	2	2	2	6		1			2	2	
	실적	2	2건심사중	2 + 2편심사중	7 + 1편심사중	13	1건 예정		6	2	2	2

2. 연구개발 목표 및 내용의 달성도

연구과제의 연구계획서 상 세부 연구개발 목표 및 내용에 대한 달성도를 자체적으로 평가한 결과, 농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발, 농촌용수 종합 정보 DB와 연계 기술 개발, 객체기반 농촌용수 해석 Platform 구성 및 종합모형 개발, 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발, 농촌용수구역 Test-bed 선정 및 모니터링 시스템 구축, 시험지구 설치·운영 및 수문/수질 자료 수집, 수집 자료의 데이터 베이스화, 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발, 동적 모의 플랫폼 개발, 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축, Test-bed 대상의 모형의 적용 및 보완 등을 포함한 모든 내용에 대한 달성도는 100%로 나타났다.

III. 연구개발의 목적 및 필요성

물순환 과정은 지역적 조건에 따라 다르게 나타나며, 이에 따라 모의 요소와 해석 기법도 다르다. 기 개발된 국내외 모형이나 시스템은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 해석하는데 한계가 있다. 우리나라 농업 유역은 논, 용·배수로, 그리고 농업용 저수지가 존재하며, 이는 국외에서 개발된 모형의 지역·환경적 조건과 다르다. 또한, 논 및 저수지에서의 물관리 방식 등 인위적 요소 또한 국외 조건과 다르다. 이와 같이 농촌용수 해석이 직면하는 문제의 복잡성은 광범위한 요소가 포함되고 있어 가중되고 있으며, 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모형 형태의 객체지향 모델링 시스템 구축이 필요하다.

본 연구의 최종목표는 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여, 종합적 농촌용수 요소별 해석 기술 및 모듈 개발, 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 Framework 및 동적 모의 플랫폼 개발, 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안 등을 통하여 농촌수자원의 체계적·과학적 해석 및 관리 시스템을 개발하는데 있다.

IV. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 주요 연구개발 내용은

- ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 모듈 설계 및 통합 해석 기술 개발
 - 농촌용수 해석 모의 요소별 첨단 해석 기술 개발
 - 요소 해석 기술의 민감도 분석 및 평가 기술 개발
 - 용수구역 단위 모형 매개변수 최적화 기법 개발
 - 객체지향 모델링 기법 기반의 플랫폼 설계 기법 개발
 - 농촌용수 종합정보시스템과의 연계 모듈 기법 개발
- ② 객체 지향의 요소별 해석 모듈 개발 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 객체지향 모델링 기반의 농촌용수 요소 모듈화 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축
 - 시·공간 자료의 모형 적용을 위한 전/후처리 모듈 개발
- ③ 농촌용수 종합해석모형의 시험적용·평가 및 실용화 방안
 - 농촌용수 시험지구 선정, 현장조사 및 운영
 - 농촌용수 개발모듈의 시험지구 적용 및 평가

- 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안

등과 같으며, 이를 종합하여 연구범위를 구체적으로 분류하면 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소 정립, 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 통합모델링 최적화 기술의 개발, 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발, 객체지향 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발, 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발, 농촌용수종합정보 자료 관리 및 표준화 시스템 개발, 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링, 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 분석, 그리고 농촌용수 물순환 해석 모델링 Framework의 사용자지침서 작성 등이다.

V. 연구개발결과

1. 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소 정립

농촌용수의 물순환 과정을 정립하였고, 농업유역을 저수지 상류유역, 농업용 저수지, 저수지 유역으로 구분하였다. 저수지 상류유역의 모의요소로는 유역 유출량, 유역 증발산량, 지하 침투량, 그리고 상류 오염부하량을 선정하였다. 저수지 하류 유역의 모의요소로는 증발산량, 유효수량, 필요수량, 송수 손실량, 관개지구 배수량, 시설재배지 유출량, 비관개지구 유출량, 지하수 유출량, 논 비점 오염부하량, 그리고 하류유역 오염부하량 등을 선정하였다. 저수지의 모의요소로는 농업용수 공급량, 만수위 방류량, 제한수위 방류량, 환경용수 공급량, 그리고 저수지 수위 등을 선정하였다.

2. 저수지 상류유역 물순환 해석 해석기법의 개발 및 적용

미계측 저수지 상류 유역의 유출량을 추정하기 위하여 Tank 모형의 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하였다. 이는 매개변수의 제한범위를 고려하고 기존에 비해 장기간의 실측 자료를 이용하여 회귀식을 개발하였으며 적용성을 평가하였다.

미계측 유역의 오염부하량 추정을 위해, 수질 및 유량 자료 확보 유역 81개를 대상으로 LOADEST 회귀모형의 유역별 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석 및 인공신경망을 이용하여 토지이용, 유역면적, 유로연장 등 유역특성인자에 따른 매개변수 추정방법을 개발하였다. 또한, 개발된 방법을 시범유역을 대상으로 적용성을 검토하였다.

본 연구에서는 Tank 모형과 SWAT 모형의 비교를 통한 Tank 모형의 적용성을 검토하기 위하여, 최적화 기법을 이용하여 Tank 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 보정 후 유출량을 비교하고 평가하였으며, 그 결과 Tank 모형이 대체로 우수한 모의 결과를 보였다. Tank 모형의 이용은 편의성을 유지하며 모의 능력이 떨어지지 않는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용

농업용 저수지 물순환 해석기법은 저수지 물수지식을 적용하여 저수지 유입량, 농업용수 공급량, 그리고 저수지 운영규칙 등을 고려하여 개발하였으며, 적용성을 평가하였

다. 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용수 공급량 모형은 연별 변화를 고려하지 않은 경우에 비해 우수하게 나타났다. 농업용 저수지 물수지 모형을 공급량 모형과 유입량 모형을 연계하여 개발하였다. 또한, 홍수기 제한수위와 연단위 관개효율 변화를 고려하는 새로운 저수지 운영규칙을 개발하였다.

농업용 저수지의 수질 모의에 적용할 수 있는 수질 해석 기법으로, 향후 농촌용수 물순환 종합해석 모형의 확장에 용이하도록 비교적 간단하게 사용할 수 있는 ARSIM-rev, BATHTUB 및 EUTROMOD 모형의 수질해석 기법을 정립하였다.

4. 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용

본 연구에서는 복합영농 관개지구 수문해석 모형을 개발하였으며, 이를 이용하여 광역 논 배수량을 모의한 결과, 모의치가 실측치와 유사하게 모의되는 것으로 나타났다.

저수지 하류유역의 유출량을 추정하기 위하여 하천 네트워크 해석 기반의 하천유량 추정 모형을 개발하였으며, 이동저수지 유역에 적용성을 평가하였다.

CREAMS-PADDY 모형을 기작을 일부 개선/수정하였고, 전·후처리 컴포넌트를 개발하였다. 전처리 컴포넌트는 기상 입력자료를 자동으로 구축할 수 있고, 매개변수 입력 편의성이 개선된 GUI 환경을 제공한다. 후처리 컴포넌트에서는 수정 CREAMS-PADDY 모형의 모의 결과인 논 포장 배수량, T-N 오염부하량, T-P 오염부하량 등을 도식적으로 보여주며, 실측치를 입력하면 통계 지표 또한 자동으로 계산한다.

5. 통합모델링 최적화 기술의 개발

본 연구에서는 통합모델링 최적화 기술을 개발하였으며, 최적화 모듈은 최적화기법 선택 부분, 목적함수 설정 부분, 매개변수 갯수 설정 부분, 제약조건 설정 부분, 그리고 기타 조건의 설정 부분 등으로 구성되어 있다. 최적화 모듈은 R^2 , Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) 등을 포함한 13개 함수식을 지원한다.

6. 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발

농촌용수의 효율적 관리를 위한 의사결정지원 기술을 개발하기 위하여, 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술, 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술, 그리고 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술 등을 개발하였고, 그 적용성을 평가하였다.

7. 객체지향 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발

농촌용수 물순환 종합해석을 위한 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼은 유연성과 확장성을 고려하여 개발하였으며, 개별 모듈을 언제든지 바꾸거나 추가하여 전체 시스템을 어느 현상에서든 쉽게 적용 가능하도록 구성하였다.

모듈 유형은 계산 모듈, 입력 자료 생성 모듈, 출력 자료 도시화 모듈이 있으며 Tank 모형 분석 등 총 21개에 모듈을 개발하였다. 개발된 플랫폼에서는 플랫폼의 신규 프로젝트를 생성 할 수 있고 저장 할 수 있으며 기존에 저장된 프로젝트 (사용자 맞춤형 모형)를 불러 올 수 있도록 구성하였다.

8. 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발

본 연구과제에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM (COMponent-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)을 개발하였다. COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을 인터페이스를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었으며, COMFARM 시스템·환경 관리자·모형 관리자·자료 관리자·모형 래핑 관리자·그래픽 사용자 인터페이스 등 총 6개의 주요 구성 모듈로 이루어져 있다.

9. 농촌용수종합정보 자료 관리 및 표준화 시스템 개발

본 연구에서는 농촌용수종합정보 데이터베이스 구축, 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발, 농촌용수종합정보 시·공간 자료 표준화 시스템 개발 등을 통해 농촌용수 종합정보/자료 관리 및 표준화 시스템을 개발하였다. 농촌용수 데이터베이스를 구축하기 위해 기상/지형/수문/수질/토양/영농 자료를 수집하고 개체관계도를 설계하였으며, 이를 바탕으로 농촌용수 종합정보 자료 관리 시스템의 인터페이스를 구축하였다. 대상 유역을 선정하고 자료 관리 시스템의 적용성을 평가하였다. 또한, 농촌용수 종합정보 자료 표준화 시스템 개발을 위하여 기상/수문/지형 인자의 전처리/표준화 기법을 개발하였고 시스템의 적용성을 평가하였다.

10. 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링

농업용수 시험지구로써의 대표성 및 적정여부 등 고려하여 이동지구, 동진지구, 농어촌연구원 시험포장 등 국내 지구와 우즈베키스탄 타슈켄트 국외지구를 선정하였다. 농촌용수 물순환 모니터링 시스템을 구축하여 시험지구의 기상/수문/영농/물관리 모니터링을 실시하였으며, 자료의 품질을 평가하였다.

11. 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 분석

COMFARM의 적용성 평가를 위해 동진지구를 대상으로 저수지 물수지 모형의 보정 및 검정, 농업용수 공급량 모형의 보정 및 검정, 그리고 모의 결과를 분석·평가·고찰하였다. COMFARM은 농촌유역의 특징을 반영하여 모의하는데 뛰어난 적용성을 보였다.

12. COMFARM 매뉴얼 개발

COMFARM의 매뉴얼을 개발하였으며, 개요, 적용분야, 기능, 설치 방법, COMFARM 모듈 및 입력자료에 대한 설명, 모듈의 실행 방법, COMFARM의 실행 방법 등을 포함하고 있다.

13. 농촌용수 모형 사용자 설문조사

농촌용수 물순환 해석 요소기술 및 모델링 Framework 개발의 사전단계로 사용자 설문조사를 실시하였고, 그 결과를 분석하였다.

VI. 연구성과 및 성과활용 계획

1. 연구개발 성과

가. 특허

본 연구에서는 컴포넌트기반 모델링 프레임워크 COMFARM을 개발하는 과정에서 <농촌용수해석 모델링 방법 및 장치> (출원번호: 10-2014-0068639)이 출원되었다. 또한, 농촌용수 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하는 과정에서 <농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치> (출원번호: 10-2015-072291-62)가 출원되었다.

나. 논문 및 학술발표

SCI 논문으로는 3편의 논문이 SCI급 국제학술지에 게재 확정되어 SCI 성과 목표를 모두 달성하였으며, 현재 출판을 기다리는 중이다. 이외에 1편의 SCI 논문을 투고하여 2015년 8월 현재 기점에서 심사 중에 있다.

비SCI 논문은 7편이 한국농공학회논문집, 한국농촌계획학회논문집, 한국수자원학회 논문집 등에 게재되어 성과 목표를 모두 달성하였다. 이외에 1편의 논문을 국내 학술지에 투고하였으며, 2015년 8월 현재 심사 중에 있다.

본 연구의 계획서 상에는 학술발표 목표가 없었으나, 본 연구 내용을 홍보하고 연구 결과에 대해 국내·외 전문가들과 토의하기 위하여 학술발표대회에 참가하여 13회의 학술발표 실적을 달성하였다.

다. 정책자료

본 연구과제를 수행하는 동안 <수자원장기종합계획에 적용되는 농업용수 회귀율 산정 개선 방안 제안>과 <농업수자원 모델링 분야의 지속적/장기적 추진 및 지원> 등 2건을 정책 제안하였으며, 성과목표를 모두 달성하였다.

라. 홍보실적

연구과제를 수행하는 중에 <수문 모형 매개변수 최적화 방법 소개>와 <농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개> 등 2편의 학술 기사를 한국농공학회의 [전원과 자원]매체에 기고하여 정량적 목표를 모두 달성하였다.

마. 인력양성

본 연구과제에서는 공학석사 4명, 공학사 2명의 인력이 양성되었다.

바. 단행본 발간

본 연구를 통해 수집한 정보를 바탕으로, 관련 전공 연구자가 대표 수리/수문/수질 모형을 쉽게 접하고 적용할 수 있는 기회를 제공하기 위하여 <수질모델링의 이해 및 적용> (도서출판 마루북스, ISBN 78-89-97259-02-1 93530)라는 단행본을 발간

하였다.

사. 수상 실적

본 연구과제를 통해 게재된 논문 중 <복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발>은 연구의 우수성을 인정받아 한국농공학회 논문상 (농공학 제 2014-08호)을 수상하였다.

2. 성과활용 계획

가. 실용화·산업화 계획

본 연구에서 개발된 COMFARM 관련 특허는 등록을 위한 심사 중에 있으며, 등록이 완료되면 실용화·산업화를 위한 기술이전을 계획하고 있다. COMFARM을 통해 기존의 KOICA사업 등 국제 협력에서 관개시설, 저수지 등의 설계 시공과 같이 하드웨어 위주에서 소프트웨어의 제공을 포함하는 종합 패키지 국제협력 사업 수출 및 기술 원조에 활용이 가능하다.

한국형 농촌용수 해석 모형의 개발을 통해 모델링 기법 및 적용성 등의 원천기술에 대한 지적재산권 확보 및 이를 통한 실용화·산업화가 기대된다. 외국 모형에 대한 수입 대체 효과뿐만 아니라 농촌용수의 이수·치수, 환경, 시설물 설계 기준 정립 및 계획 등의 정책 수립에 활용이 기대된다. 특히, COMFARM은 지역적 특성을 충분히 고려한 지역 특이적 문제해결에 부합하는 맞춤형 해석 요소기술을 제공함으로써, 용수구역단위의 중장기 농촌용수 활용 계획 정책 수립에 활용이 가능할 것이다.

본 연구성과를 통해 기후변화 대응 유역 수문·수질 모형 개발 분야의 학술 교류나 관련 연구 분야의 활성화가 기대되며, 관련 분야의 기술 선점에 따른 국내에서 국제학술회의 개최 등을 통해 경제적 활성화가 기대된다.

우리나라 농촌지역 특성 및 기후변화를 고려한 수자원의 물수요분석 등의 가뭄 및 홍수 등에 대한 전방위적 대처를 통한 국가 예산의 효율성 증진이 기대된다.

또한, 효율적인 농업용수 관리방안 수립을 위한 요소기술 개발로 대체용수개발에 기여할 것으로 예상되고, 대체수자원 활용 시범사업을 통해, 정책적인 활용기반 조성에 기여할 수 있다.

나. 기술확산 계획

본 연구과제를 통해 발간된 <수질 모델링의 이해 및 적용>은 수문·수리·수질 모형의 기본적 이론, 모형 적용 과정, 그리고 적용 사례 등을 수록하고 있으며, 대학원 석사과정의 참고교재로 활용될 수 있으며, 관개배수공학, 수문학, 수자원공학, 수공설계 등의 학부수업 실습교재로도 선별적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구개발 모델링 Framework의 경우 농촌용수 물순환 요소 모의 및 각 요소 간 연계 등을 실제적으로 수행할 수 있어 농업수자원 관련 전공 학부·대학원생들에게 농촌용수 물순환에 대한 실제적 이해를 제공하는 기회를 제공할 것이다. 더불어 모델링 Framework은 SCI/KCI 논문 등을 통해 검증된 최신 해석기법을 포함하고 있어, 물관리 의사결정권자는 상기 Framework를 통해 기존 모형에 비해 보다 합리적인 농촌용

수 관리 시나리오에 따른 물순환 해석을 수행할 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 컴포넌트 기반 모델링 Framework COMFARM의 기본적 이론, 모듈 및 입력자료에 대한 설명, 그리고 모듈의 실행 방법 등을 학술지를 통해 홍보할 계획이다.

다. 지적재산권 확보계획

컴포넌트기반 모델링 프레임워크 COMFARM을 개발하는 과정에서 출원된 특허와 농촌용수 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하는 과정에서 출원된 특허가 빠른 시일 내에 등록될 것으로 예상하고 있다.

본 연구기간 동안 게재 확정된 SCI 논문 이외에 1편의 다른 SCI 논문이 투고되어 심사 중에 있으며, 심사 후 게재될 예정이다. 또한, 작성 시점에서 1편의 논문이 국내 KCI 학술지에 투고되어 심사 중에 있다. 그밖에도 논문으로 계획 중인 주제가 다수 있으며, 국내외 다방면으로 게재할 것으로 예상하고 있다.

라. 타연구에 활용계획

농촌유역을 대상으로 기후변화, 유역특성변화, 불확실성 요소, 사회/경제적 영향, 그리고 환경변화에 따른 영향 등의 대내외적 다양성과 복잡성을 반영하여 고려할 수 있는 요소 모듈 기반의 탄력적 홍수위험 관리 프레임워크를 개발이 필요하며, 이를 위해 본 과제의 주관연구기관인 서울대학교는 정부의 지원을 받아 “농촌유역 홍수관리를 위한 지능형 요소기반 해석 시스템 개발”이라는 연구과제를 수행 중이다. 그 연구 과정에서 본 연구에서 개발된 요소기술 등이 연계되어 활용이 가능할 것이다.

SUMMARY

I. Title of the Project

Development of a Rural Water Resources Assessment Tool

II. Study outcomes

Two patents were applied and under review for registration. Total 9 research papers including two to the SCI journals were published. Transfer of the developed technology is expected after patent registration. Also two policy proposal were made and two articles were published in the academic magazine as part of technology advertisement. In addition to the proposed goals, 13 papers were presented in domestic or international conferences and 6 academic degrees were bestowed based on this study outcome. We were also able to publish a book and received a best paper award from an academic society. With such achievements, we believe that the proposed study goals were fully attained.

III. Objectives of the Project

Because of the many complicating factors inherent in water-cycle analyses of agricultural watersheds, hydrologic modeling must be carefully designed to reflect the physical characteristics along with complex and diverse agricultural practices for efficient water management. Hence, component-based approaches are less common in modeling frameworks specifically designed in the domain of agricultural watershed-scale water resources, especially characterized with irrigation-reservoir operation and paddy-field processes (i.e., irrigation and drainage). The currently available modeling frameworks based on components is hardly applicable in agricultural water resources analyses at a watershed-scale. Thus, there is a need to develop a component-based modeling framework that offers modelers and users an alternative approach to implementing plug-and-play components for watershed scale agricultural water-resource planning and management. The main objectives of this study are (1) to develop a Component-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM) using an object-oriented programming technique; and (2) to evaluate its applicability for an agricultural watershed with diverse and complicated land use as a case study.

IV. Contents of the Project

1. Establishment of a Cycle of Rural Water Resources and Related Modeling Elements
2. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Upstream Watersheds of Reservoirs
3. Development and Application of a Component for Assessing Reservoir Water Resources
4. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Downstream Watersheds of Reservoirs
5. Development of a Parameter Optimization Component
6. Development of a Decision Support System for Management of Agricultural Water Resources
7. Development of Object-Oriented Modules and a Module Integration Platform
8. Development of a Component-Based Modelling Framework for Agricultural Water-Resource Management
9. Development of Web-Based Data Processing and Model Linkage Techniques for Agricultural Water-Resource Analysis
10. Study Site and Monitoring System
11. Evaluation of the Applicability of the COMFARM
12. Development of User's Guide for the COMFARM
13. User Survey

V. Results of the Project

1. Establishment of Cycle of Rural Water Resources and Related Modeling Elements

In this project, cycle of agricultural water resources was established by dividing agricultural watersheds into upstream watershed, reservoir, and downstream water district. The modeling factors related to the agricultural watersheds were also clarified.

2. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Upstream Watersheds of Reservoirs

In this study, regression equations for estimating the 3th TANK model parameters considering their variations for the unguaged watersheds were

developed and evaluated. The simulation results from parameters determined by the developed regression equations were in good agreement with the observations.

To simulate pollutant loads for ungauged watersheds, regression equations of LOADEST coefficients against the watershed characteristic including watershed area, landuse, and watershed length were developed using multiple regression analysis and artificial neural networks.

To evaluate runoff simulated from TANK model, we compared the model with the soil and water assessment tool (SWAT) model. Statistical results indicated that the TANK model better simulated rainfall runoff than the SWAT model. The TANK model could be a good tool for runoff simulation considering its ease of use.

3. Development and Application of a Component for Assessing Reservoir Water Resources

We developed components for assessing reservoir water resources considering reservoir inflow, agricultural water supply, and reservoir operation rules. A new reservoir operation scheme by considering flood control and irrigation efficiency variation for simulating reservoir water balance components was developed, and its applicability was evaluated.

Simple Methods for estimating reservoir water quality were established through investigating ARSIM–rev, BATHTUB and EUTROMOD model. These methods can be used to develop a water quality component of the COMFARM

4. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Downstream Watersheds of Reservoirs

In this study, a hydrologic simulation model to estimate surface drainage for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation was developed. A water flows network modeling system considering irrigation return flow and reservoir outflows was constructed/evaluated to quantify water flows in the agricultural watersheds.

A water quality simulation system based on the CREAMS–PADDY model was also developed for paddy fields to evaluate the effects of BMPs. With this system, the CREAMS–PADDY model can be extended with new components allowing user–friendly applications of the model. Components are available for pre– and post–processing, including the manipulation of meteorological data, management of input parameters, and visualization of output results.

5. Development of a Parameter Optimization Component

A parameter optimization component was developed in this research. Parameters of models can be optimized through selection of optimization methods, the number of parameters, objective functions, constraints, and other conditions.

6. Development of a Decision Support System for Management of Agricultural Water Resources

A decision support system for efficient operation and management of agricultural water resources was developed. Using the system, climate change impacts on water storage of an agricultural reservoir, variations of reservoir water balance according to releasing environmental water, and reduction effects on farming methods in paddy fields at a watershed scale were conducted.

7. Development of Object-Oriented Modules and a Module Integration Platform

In this study, object-oriented modules and a module integration platform for modeling agricultural water resources were developed. In order to facilitate design of a modeling system with linkable components, basic modules were developed in this study for a comprehensive assessment of rural water management and operations. These basic modules are broadly categorized into simulation modules, input-data generation modules, and output-data modules. A total of 21 modules were developed in this study. All of the modular-element models have a common structure, and the data-linking method is standardized in a modular form that can be shared and implemented across a wide range of modeling frameworks.

8. Development of a Component-Based Modelling Framework for Agricultural Water-Resource Management

In this study, a component-based modeling framework for agricultural water-resource management (COMFARM) was developed and implemented on the basis of object-oriented programming. The COMFARM provides a flexible environment to accommodate data exchange and synchronization with low-level communication, using standardized and unambiguously defined interfaces, data structures, communication protocols, and file formats. The COMFARM consists of six primary architectural modules: the COMFARM Framework Module, Configuration Manager, Model Manager, Data Manager, Model-wrapping Manager, and Graphical User Interface (GUI).

9. Development of Web-Based Data Processing and Model Linkage Techniques for Agricultural Water-Resource Analysis

In this study, a web-based Data processing and Model linkage Techniques for Agricultural Water-Resource analysis (AWR-DMT) was developed. The developed techniques consisted of a database development, data processing technique, and model linkage technique. The database was constructed using MS SQL with data code, watershed characteristics, reservoir information, weather station information, meteorological data, processed data, hydrological data, and paddy field information.

10. Study Site and Monitoring System

The Idong district, Dongjin district, paddy fields in Rural Research Institute, and Tashkent district were selected to observe rural water resources including irrigation, drainage, stream flow, and reservoir water storage. Monitoring systems were established at those regions. Climate, hydrological data, and farming data were observed from the system, and used for calibration, validation, and application.

11. Evaluation of the Applicability of the COMFARM

To evaluate the applicability of the COMFARM, the reservoir water balance component and the agricultural water supply component of the COMFARM were applied for the Dongjin district. Through calibration and validation with statistical and graphical analyses, the COMFARM performed well demonstrating good agreement with observed values.

12. Development of User' s Guide for the COMFARM

The user' s guide of the COMFARM was developed. It included introduction, installing the COMFARM interface, preparing the COMFARM input, start COMFARM, and the example data set, and etc.

13. User Survey

We conducted and analysed an user survey before developing the COMFARM.

VI. Project accomplishments and Application plan

1. Project accomplishments

A. Patent registration

Two patents were applied for registration as the study outcome. One is

“METHOD AND APPARATUS FOR MODELING OF INTERPRETATION FOR AGRICULTURAL WATER>” (Registration No.: 10-2014-0068639) and the other is entitled by “METHOD AND APPARATUS FOR PROVIDING MODELING INPUT DATA FOR INTERPRETATION OF AGRICULTURAL WATER” (Registration No.: 10-2015-072291-62).

B. Publication of research papers

Three papers were accepted to the SCI listed journals and under publication process. Another one paper was submitted to the SCI journals and under review. Seven of the KCI papers were published in the journals of the KSAE, the KSRP, and the KWRA, while one paper are under review for publication. Besides, 13 proceeding papers or posters were presented in the domestic of international conferences although this was not the study requirement.

C. Policy suggestion

Two policies related to agricultural return flow estimation and modeling of agricultural water resources were proposed.

D. Promotion

Two articles were published to the KSAE magazine of Rural Resources. The titles are “Introduction of a parameter optimization for watershed models using MATLAB” and “Introduction of Component-based modeling framework for agricultural water-resources management” .

E. Manpower development

Four of master and two of bachelor degree were conferred from this study result.

F. Book publication

A book entitled by “Water quality models: the fundamental principles and applications” was published by Maroo-Books (ISBN 78-89-97259-02-1 93530).

G. Reward

The paper of “Surface Drainage Simulation Model for Irrigation Districts Composed of Paddy and Protected Cultivation” was awarded as one of the best papers from the KSAE (No 2014-08).

2. Application plan

A. Commercialization or practical application

Two patents are under review for the registration and transfer of the developed modeling framework (COMFARM) is planned after registration process is finished. Potential application of the COMFARM includes to facilitate design of agricultural irrigation and reservoir system for the developing countries as part of international aid program by KOICA. The model framework was developed on a modular basis and allows for customized simulation setup to fully consider site-specific characteristics.

B. Technology transfer

Investigation on the previous modeling methods and models bore a fruit of a book <Water quality models: the fundamental principles and applications>. This book contains fundamental principles on hydrology, hydraulics, and water quality simulation, and also deals with model application process with case studies. The book can be used a textbook for graduate study and auxiliary material to irrigation & drainage, water resources engineering.

C. Intellectual property

Two patents related to component-based modeling framework development and web-based data processing and linking technology for model setup, respectively, are expected to be registered in near future, thus will be an intellectual asset of this study. Also all the scientific papers including two of SCI journals will be recognized as the intellectual outcomes of the study.

D. Extension to other studies

There exists many uncertainties in agricultural watersheds in regard to climate change, watershed characteristics, and socio-economic & environmental changes. This study outcome can be further extended to accommodate flexible flood risk management using modular-base modeling methodology. Currently we attempt to apply the COMFARM for the development of a smart flood risk management system in agricultural watersheds.

CONTENTS

Chapter 1. Project Overview	1
Chapter 2. Current Technological Status	23
Chapter 3. Contents and Results of the Project	63
Section 1. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Upstream Watersheds of Reservoirs	63
Section 2. Development and Application of a Component for Assessing Reservoir Water Resources	123
Section 3. Development and Application of Components for Assessing Rural Water Resources in Downstream Watersheds of Reservoirs	171
Section 4. Development of a Parameter Optimization Component	239
Section 5. Development of a Decision Support System for Management of Agricultural Water Resources	263
Section 6. Development of Object-Oriented Modules and a Module Integration Platform	273
Section 7. Development of a Component-Based Modelling Framework for Agricultural Water-Resource Management	295
Section 8. Development of Web-Based Data Processing and Model Linkage Techniques for Agricultural Water-Resource Analysis	319
Section 9. Study Site and Monitoring System	359
Section 10. Evaluation of the Applicability of the COMFARM	439
Chapter 4. Achievement of objectives and Contribution to Related Fields	483
Section 1. Focal points of evaluation	483
Section 2. Achievement of objectives	484
Section 3. Contribution to related fields	495
Chapter 5. Project Accomplishments and Application Plan	501
Section 1. Project accomplishments	501
Section 2. Application plan	512
Chapter 6. Collected International Science and Technology Information	515
Section 1. International conference	515
Section 2. International report and book	517
Section 2. International peer-reviewed paper	540
Chapter 7. Research Facilities and Equipments Status	545

Chapter 8. Laboratory Safety Plan	551
Chapter 9. References	553
<Appendix I >. Patent, Research Paper and Market Analysis Report	583
<Appendix II >. CONFARM MANUAL	591
<Appendix III >. User Survey	653
<Appendix IV >. Project Accomplishments Supplements	659

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 서 론	1
제 2 절 연구의 배경	3
제 3 절 연구개발의 필요성	6
1. 기존 연구의 문제점 및 앞으로의 전망	6
2. 연구개발의 필요성	8
제 4 절 연구개발 목표 및 내용	9
1. 연구개발의 최종목표 및 주요내용	9
2. 연차별 연구개발의 목표 및 내용	10
제 5 절 추진방법 및 체계	11
1. 추진방법	11
2. 추진체계	12
제 6 절 최종보고서 체계	13
제 7 절 연구성과 목표 대비 실적	18
1. 정량적 성과 목표 및 실적	18
2. 연구개발 목표 및 내용의 달성 실적	18
제 8 절 자문결과	20
제 9 절 요약	21
제 2 장 국내외 기술개발 현황	23
제 1 절 서 론	23
제 2 절 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소	25
제 3 절 국내외 물순환 해석 모형의 개발현황	29
1. 물순환 모형의 구분 및 개발현황	29
2. 저수지 상류유역 물순환 해석	35

3. 저수지 수문·수질 및 모의조작	39
4. 저수지 하류유역 물순환 해석	45
제 4 절 컴포넌트 기반 모델링 Framework 연계 기술	51
1. 용어 정의	51
2. 컴포넌트 기반 Framework	52
3. 모델링 Framework 연계 기술	53
제 5 절 국내외 기술개발현황 요약	57
제 6 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치	59
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	63
제 1 절 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용	63
1. 서론	63
2. 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 구성	65
3. 미계측 저수지 상류유역 수문 해석 모형의 개발 및 적용	66
4. 저수지 상류유역 수질 해석 모형의 개발 및 적용	100
5. 요약 및 결론	120
제 2 절 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용	123
1. 서론	123
2. 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성	125
3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용	127
4. 농업용 저수지 물수지 해석 모형의 개발 및 적용	139
5. 농업용 저수지 수질 해석기법	159
6. 요약 및 결론	168
제 3 절 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용	171
1. 서론	171
2. 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성	172
3. 논에서의 수문·수질 해석 모형의 개발 및 적용	175
4. 복합영농 관개지구 배수량 추정 모형의 개발 및 적용	198
5. 관개지구 회귀 특성 분석	220
6. 하천 네트워크 해석 기반 유량 해석 모형 개발 및 적용	230
7. 요약 및 결론	236
제 4 절 통합모델링 최적화 기술의 개발	239

1. 서론	239
2. 매개변수 최적화 모듈의 개발	240
3. 최적화 모듈의 적용성 평가	255
4. 요약 및 결론	261
제 5 절 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발	263
1. 서론	263
2. 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술 개발	263
3. 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술	267
4. 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술	268
5. 요약 및 결론	270
제 6 절 객체 지향의 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발	273
1. 서론	273
2. 개발환경	274
3. 객체지향 모델링 기반 요소기술 개발	275
4. 모듈 기반의 플랫폼 개발	278
5. 모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석	284
6. 요약 및 결론	293
제 7 절 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발	295
1. 서론	295
2. 농촌용수 물순환 해석의 Framework 개발 (COMFARM)	297
3. COMFARM 컴포넌트 구성/개발	309
4. COMFARM을 이용한 농업유역 모델링	315
5. 요약 및 결론	318
제 8 절 농촌용수종합정보 자료 관리 및 표준화 시스템 개발	319
1. 서론	319
2. 농촌용수종합정보 데이터베이스 구축	321
3. 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발	337
4. 농촌용수종합정보 웹기반 시·공간 자료 표준화 시스템 개발	344
5. 요약 및 결론	356
제 9 절 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링	359
1. 서론	359
2. 시험지구 현장 수리시설 및 현황조사	359
3. 시험지구 물순환 모니터링 및 자료 품질평가	373
4. 영상기반 수위·유량 현장검증 모듈 개발	414
5. 요약 및 결론	436

제 10 절 농업용수 해석모형의 적용성 평가	439
1. 서론	439
2. 저수지 유역 모형의 적용	439
3. 농업용수 공급량 모형의 적용	449
4. 모형적용의 결과 분석 및 평가	460
5. COMFARM의 모의능력 평가	472
6. COMFARM의 사용자 편의성 개선사항 분석	473
7. 요약 및 결론	481
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	483
제1절 연구목표 및 평가착안점	483
1. 연구목표	483
2. 평가 착안점	484
제2절 연구개발 목표 및 내용의 달성도	484
1. 세부 연구개발 목표	487
2. 세부 연구개발 내용 및 달성도	487
제3절 관련분야에의 기여도	495
1. 관련분야 학술·기술발전 기여도	495
2. 기술·사회·경제적 기대성과	499
제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획	501
제1절 연구개발 성과	501
1. 지식재산권 출원	503
2. 논문 및 학술 발표 게재	504
3. 정책자료	508
4. 홍보실적	509
5. 인력양성	510
6. 단행본 발간 실적	510
7. 수상 실적	511
제 2 절 성과활용 계획	512
1. 실용화·산업화 계획	512
2. 기술확산 계획	512
3. 지식재산권 확보계획	513

4. 타연구에 활용 계획	514
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	515
제 1 절 국제학술대회	515
1. 2013년 ASABE	515
2. 2013년 PAWEES	515
3. 2014년 ASABE	516
4. 2014년 ICID	516
5. 2015년 세계물포럼	516
제 2 절 해외 보고서 및 단행본	517
1. 물순환 모형 보고서	517
2. 모의요소별 적용 기법	524
3. 모델링 Framework 보고서	534
제 3 절 해외 논문	540
제 7 장 연구시설·장비 현황	545
제 1 절 소프트웨어 현황	545
제 2 절 모니터링 장비 현황	545
제 8 장 연구실 안전관리 이행실적	551
제 9 장 참고 문헌	553
<첨부 I> 특허, 논문 및 시장 분석 보고서	583
<첨부 II> COMFARM 매뉴얼	591
<첨부 III> 농촌용수 모형 사용자 설문조사	653
<첨부 IV> 연구성과 증빙자료	659

표 목 차

<표 1-1> 연차별 연구개발의 목표 및 내용	10
<표 1-2> 연구개발 정량적 성과 목표 및 달성 현황	18
<표 1-3> 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용의 달성도	19
<표 1-4> 자문의견	20
<표 2-1> 농업유역의 모의요소	28
<표 2-2> 수문모형의 구분 및 종류	31
<표 2-3> 유역특성과 토지이용 특성에 따른 모형의 적용성	32
<표 2-4> 모형의 사용 적합성 특성 비교	33
<표 2-5> 모형의 입력자료 특성 비교	33
<표 2-6> 모형의 수문/수질 보정 매개변수 비교	33
<표 2-7> 기술발전 단계별 수문·수질모형의 개발 현황	34
<표 2-8> HOMWRS 모형의 개선되어야 할 사항	43
<표 2-9> 국내외 배수량 및 T-N/T-P 배출부하량 모니터링 결과	50
<표 2-10> 농촌용수 물순환 해석 모형의 용어 정의	51
<표 2-11> 모델링의 정의 및 구분	54
<표 2-12> 모델 Frameworks의 특징 (Knapen, 2013)	55
<표 3-1-1> 대상유역의 면적 및 기상, 수문자료의 가용기간	71
<표 3-1-2> 대상유역의 유역면적 및 토지이용 비율	72
<표 3-1-3> 대상유역의 기상 및 수문 특성	72
<표 3-1-4> Tank 모형의 보정 및 검정 기간	73
<표 3-1-5> TANK 모형의 초깃값 및 매개변수 범위	74
<표 3-1-6> TANK 모형의 보정 결과	75
<표 3-1-7> TANK 모형의 검정 결과	77
<표 3-1-8> 유역특성인자와 TANK모형 매개변수 사이의 상관분석 결과	78
<표 3-1-9> TANK 모델 매개변수의 지역화식 개발 결과	79
<표 3-1-10> 유역별 회귀식 적용 결과	81
<표 3-1-11> 국내 표준유역, 단위유역 및 주요지점 유역의 유역경사	83
<표 3-1-12> 개발된 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case I)	84
<표 3-1-13> 유역별 매개변수 지역화식 적용결과 (Case I)	85
<표 3-1-14> 개발된 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case II)	87
<표 3-1-15> 유역별 매개변수 지역화식 적용결과 (Case II)	88
<표 3-1-16> 대상유역의 면적, 유로장, 유역경사	89
<표 3-1-17> 실측치와 모의치의 통계적 변량	90
<표 3-1-18> 연평균 유출량 모의치와 실측치 비교	91
<표 3-1-19> 대상유역별 Tank 모형 최적 매개변수	94
<표 3-1-20> SWAT 모형의 유역별 최적 매개변수	95

<표 3-1-21> 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 통계적 변량	95
<표 3-1-22> 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 통계적 변량	98
<표 3-1-23> Tank 모형과 SWAT 모형의 연평균 유출량 비교	100
<표 3-1-24> LOADEST의 회귀모형	102
<표 3-1-25> 대상유역특성 및 토지이용현황	104
<표 3-1-26> 유역특성과 T-N 회귀모형 매개변수간의 상관계수	110
<표 3-1-27> T-N 회귀모형 매개변수 추정 회귀식과 상관계수	110
<표 3-1-28> 유역특성과 T-P 회귀모형 매개변수간의 상관계수	111
<표 3-1-29> T-P 회귀모형 매개변수 추정 회귀식과 상관계수	111
<표 3-1-30> 시범유역특성 및 토지이용현황	112
<표 3-1-31> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 추정모형 매개변수	113
<표 3-1-32> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 추정모형 통계적변량	113
<표 3-1-33> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 추정모형 매개변수	114
<표 3-1-34> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 추정모형 통계적변량	114
<표 3-1-35> 생활계 가정인구 발생부하 원단위 및 분뇨발생부하비	116
<표 3-1-36> 축산분뇨 발생부하원단위 (단위: g/두/일)	117
<표 3-1-37> 토지계 지목별 연평균 발생부하원단위 (단위: kg/km ² · 일)	117
<표 3-1-38> 양식장 발생부하 원단위 (단위 : g/m ² /일)	118
<표 3-1-39> 양식장 사료투여량 대비 발생부하비	118
<표 3-2-1> 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수	131
<표 3-2-2> 매개변수 보정 결과	135
<표 3-2-3> 보정 및 검정기간동안의 농업용수 공급량 실측치, 모의치, 그리고 통계적 변량	137
<표 3-2-4> 문헌 제시 매개변수	139
<표 3-2-5> Type A와 Type B의 통계적 변량 산정 결과 비교	139
<표 3-2-6> 대상지구 지형특성 및 저수지 제원	148
<표 3-2-7> 대상저수지의 연강수량	149
<표 3-2-8> 대상저수지의 월평균 기온 및 강우량	149
<표 3-2-9> 저수지 물수지 모형의 최적 매개변수 선정	153
<표 3-2-10> 대상저수지의 보정기간동안의 통계적 변량 산정 결과	155
<표 3-2-11> 대상저수지의 검정기간동안의 통계적 변량 산정 결과	155
<표 3-2-12> 대상저수지의 연단위 물수지 분석 결과	158
<표 3-3-1> 토양별 침투량 (Im et al., 2000)	181
<표 3-3-2> Changes of USLE C, P factor and Manning's n	182
<표 3-3-3> 수정 CREAMS-PADDY 모형에서의 물질수지 방정식	183
<표 3-3-4> 대상지구의 물수지 분석	193
<표 3-3-5> 대상지구의 T-N 수지 분석	193
<표 3-3-6> 대상지구의 T-P 수지 분석	193
<표 3-3-7> 수정 CREAMS-PADDY 모형의 통계적 변량 결과	195
<표 3-3-8> 수정 CREAMS-PADDY 모형의 보정 매개변수	195

<표 3-3-9> 물관리 시나리오	196
<표 3-3-10> 물관리 시나리오에 따른 모의 결과	198
<표 3-3-11> 관측 용수로 배수량의 비율	201
<표 3-3-12> 관개지구 배수량 모형의 매개변수 범위	205
<표 3-3-13> 대상지구의 기상자료 (2011)	207
<표 3-3-14> 대상지구의 기상자료 (2012)	207
<표 3-3-15> 이동저수지 간선수로의 수위-유량 관계식	207
<표 3-3-16> 이동저수지의 농업용수 공급량 (2001~2009)	207
<표 3-3-17> 용배수로의 수로별 수위-유량 관계식	210
<표 3-3-18> 광역 논 수문 자료 (2011)	211
<표 3-3-19> 광역 논 수문 자료 (2012)	211
<표 3-3-20> 대상지구의 영농현황	213
<표 3-3-21> 연도별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량	213
<표 3-3-22> 논 광역 배수량 모형의 보정 매개변수	216
<표 3-3-23> 보정기간에 대한 모형의 통계적 평가 결과	216
<표 3-3-24> 검정기간에 대한 모형의 통계적 평가 결과	217
<표 3-3-25> 시설재배지 유출량 모형의 모의 결과 (2010~2011)	218
<표 3-3-26> 대상 관개지구의 물수지 (2011)	219
<표 3-3-27> 대상지구 연구기간 동안의 관개회귀수량 분석 결과	224
<표 3-3-28> 관개회귀수량 구성요소의 월별 일평균 통계 비교	226
<표 3-3-29> 본 연구 및 선행 연구의 관개회귀수량 비교	229
<표 3-3-30> 진위 지점의 수위-유량 관계곡선식	234
<표 3-4-1> 대표 목적함수의 종류 및 구성식	250
<표 3-4-2> 월단위 통계 지표 평가 분류 기준 (Moriasi et al., 2007)	251
<표 3-4-3> 대상구역의 면적, 유로장, 유역경사	255
<표 3-4-4> 유역별 실측치와 모의치의 통계적 변량 (GA)	256
<표 3-4-5> 유역별 실측치와 모의치의 통계적 변량 (SA)	258
<표 3-4-6> 유역별 연평균 유출량 모의 값	261
<표 3-5-1> 기후변화에 따른 저수지 물수지 요소	266
<표 3-5-2> 대상지구 유역특성 및 토지이용현황	270
<표 3-5-3> 유역단위 오염부하량 모의결과	270
<표 3-5-4> 물관리에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과	270
<표 3-6-1> 개발 모듈 목록	284
<표 3-6-2> 개선요구사항	286
<표 3-6-3> 플랫폼 상세 개선 내용	287
<표 3-7-1> COMFARM의 Interface 정의	306
<표 3-8-1> 대분류/중분류 토지피복지도 토지이용 및 분류코드	326
<표 3-8-2> 지점별 수위-유량 관계식	329
<표 3-8-3> 포장단위 수질 모니터링 결과 (NPD-#1)	331

<표 3-8-4> 포장단위 수질 모니터링 결과 (NPD-#2)	331
<표 3-8-5> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#1)	332
<표 3-8-6> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#2)	332
<표 3-8-7> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#3)	333
<표 3-8-8> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#4)	333
<표 3-8-9> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#5)	333
<표 3-8-10> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#6)	333
<표 3-8-11> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#7)	334
<표 3-8-12> 심도별 토양 특성 결과 (2013) (sub-subject: fertilizer treatment)	334
<표 3-8-13> 지구별 작부시기	336
<표 3-8-14> 농촌용수종합정보 자료 설명	337
<표 3-8-15> 모니터링 자료의 이상치 관리 기준	341
<표 3-8-16> 저수지 상류유역 모듈의 입력자료	346
<표 3-8-17> 저수지 상류유역 모듈의 출력자료	346
<표 3-8-18> 저수지 물수지 모듈의 입력자료	346
<표 3-8-19> 저수지 물수지 모듈의 출력자료	347
<표 3-8-20> 농업용수 공급량 모듈의 입력자료	347
<표 3-8-21> 농업용수 공급량 모듈의 출력자료	347
<표 3-8-22> 토지이용 분류에 따른 유출곡선지수 기준 (AMC-II) (국토해양부, 2012)	349
<표 3-9-1> 양수장 제원	361
<표 3-9-2> 저수지 제원	361
<표 3-9-3> 이동저수지 용수간·지선별 관개면적	361
<표 3-9-4> 양수장 가동시간, 전동기상태	362
<표 3-9-5> 저수지 강우량, 저수위, 급수량(간선수위로 대체), 방류상황	362
<표 3-9-6> 이동지구의 특성	362
<표 3-9-7> 낙양보 수리시설물 현황	364
<표 3-9-8> 섬진제 용수공급량 현황	364
<표 3-9-9> 주요 기상관측소 개황	367
<표 3-9-10> 주요관측소의 월평균기온	368
<표 3-9-11> 주요관측소의 월평균 최대기온	368
<표 3-9-12> 주요관측소의 월평균 최저기온	368
<표 3-9-13> 주요 관측소의 월평균 강수량	369
<표 3-9-14> Tashkent 관측소의 월별 일조시간	369
<표 3-9-15> 주요관측소의 월평균 상대습도(%)	370
<표 3-9-16> 토양별 면적(FAO 토양분류)	371
<표 3-9-17> 토양별 특성	371
<표 3-9-18> 지점별 월 강우량(2010)	374
<표 3-9-19> 전년도 강우량 비교(2009, 2010)	376
<표 3-9-20> 이동지점 월 강우량(2011.01~2013.04)	377

<표 3-9-21> 동진지점 월강우량(2012.07~2013.04)	377
<표 3-9-22> 용덕저수지 수위 내용적 표고	378
<표 3-9-23> 미산저수지 수위 내용적 표고	379
<표 3-9-24> 이동저수지 수위 내용적 표고	379
<표 3-9-25> 금평저수지 주요 설계제원	380
<표 3-9-26> 금평저수지 표고별 내용적	382
<표 3-9-27> 금평저수지 유역내 토지이용현황	383
<표 3-9-28> 대화저수지 주요 설계제원	386
<표 3-9-29> 대화저수지 표고별 내용적	388
<표 3-9-30> 대화저수지 유역내 토지이용현황	389
<표 3-9-31> 이동강우관측소와 이동우량관측소의 강우상관성 분석 결과	392
<표 3-9-32> 용덕강우관측소와 이동우량관측소의 강우 상관성 분석 결과	393
<표 3-9-33> 미산강우관측소와 이동우량관측소의 강우상관성 분석 결과	394
<표 3-9-34> 은산강우관측소와 이동우량관측소의 강우 상관성 분석 결과	395
<표 3-9-35> 용덕저수지 수위-내용적	396
<표 3-9-36> 용덕저수지 모의결과	398
<표 3-9-37> 미산저수지 수위-내용적	399
<표 3-9-38> 미산저수지 모의결과	401
<표 3-9-39> 이동저수지 수위-내용적	402
<표 3-9-40> 이동저수지 모의결과	403
<표 3-9-41> 동진지구 관개면적 및 농업용수 공급체계 현황 (남원호 등, 2013)	409
<표 3-9-42> 측정지점별 수위-유량 관계식 산정	409
<표 3-9-43> 표면영상유속계 주요 역사	416
<표 3-9-44> 인공영상 생성 자료	428
<표 3-9-45> 표면 영상 유속계 시험 개요	431
<표 3-10-1> 대상지구 지형특성 및 저수지 제원	441
<표 3-10-2> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(대화저수지)	442
<표 3-10-3> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (대화저수지)	443
<표 3-10-4> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(금평저수지)	444
<표 3-10-5> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (금평저수지)	444
<표 3-10-6> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(당월저수지)	446
<표 3-10-7> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (당월저수지)	446
<표 3-10-8> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(선암저수지)	447
<표 3-10-9> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (선암저수지)	449
<표 3-10-10> 동진지구 관개면적 및 용수 공급체계 현황 (남원호 등, 2013)	449
<표 3-10-11> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (화호지선)	450
<표 3-10-12> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (화호지선)	450
<표 3-10-13> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (대평지선)	452
<표 3-10-14> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (대평지선)	452

<표 3-10-15> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (감곡지선)	453
<표 3-10-16> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (감곡지선)	454
<표 3-10-17> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (신용지선)	455
<표 3-10-18> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (신용지선)	455
<표 3-10-19> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (용성지선)	457
<표 3-10-20> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (용성지선)	457
<표 3-10-21> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (종신지선)	458
<표 3-10-22> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (종신지선)	459
<표 3-10-23> 대화저수지의 물수지 분석 결과	460
<표 3-10-24> 금평저수지의 물수지 분석 결과	461
<표 3-10-25> 당월저수지의 물수지 분석 결과	462
<표 3-10-26> 선암저수지의 물수지 분석 결과	463
<표 3-10-27> 화호지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	464
<표 3-10-28> 대평지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	466
<표 3-10-29> 감곡지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	467
<표 3-10-30> 신용지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	468
<표 3-10-31> 용성지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	470
<표 3-10-32> 종신지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교	471
<표 3-10-33> HOMWRS 모형의 시스템적인 개선사항	473
<표 4-1> 평가의 착안점 및 기준	484
<표 4-2> 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용의 달성도	485
<표 5-1> 총 연구기간 동안의 연구개발 정량적 성과 목표 및 달성 현황 (단위 : 건수)	502
<표 5-2> 지식재산권 출원 실적	503
<표 5-3> 학술논문게재 실적	506
<표 5-4> 학술회의 발표 실적	507
<표 5-5> 정책자료	508
<표 5-6> 홍보실적	509
<표 5-7> 인력양성 실적	510
<표 5-8> 단행본 실적	510
<표 5-9> 수상 실적	511
<표 6-1> 초과 강우 (or 침투량) 산정 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)	524
<표 6-2> 지표추적 (Overland routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)	527
<표 6-3> 하도추적(Channel routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)	528
<표 6-4> 지하수 흐름 해석 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)	529
<표 6-5> 해외 투고 논문: PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT	541
<표 6-6> 해외 투고 논문: PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE	542
<표 6-7> 해외 투고 논문: WATER BALANCE OF IRRIGATION RESERVOIRS CONSIDERING	

FLOOD CONTROL AND IRRIGATION EFFICIENCY VARIATION	542
<표 6-8> 해외 투고 논문: DEVELOPMENT OF A COMPONENT-BASED MODELING FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL WATER-RESOURCE MANAGEMENT	542
<표 6-9> 본 연구에서 인용한 2009년 이후 대표 해외 논문	543
<표 7-1> 이동지구 관측망 관측기기 내역	546
<표 7-2> 동진지구 관측망 관측기기 내역	547
<표 7-3> 농어촌연구원 시험지구 계측기 현황	548
<표 7-4> 농촌용수 모니터링 서버	549
<표 첨부 I-1> 본 연구과제를 통한 기술 달성 수준	583
<표 첨부 I-2> 특허 검색 기간 및 범위	583
<표 첨부 I-3> 특허 검색 결과	584
<표 첨부 I-4> 논문 검색 기간 및 범위	584
<표 첨부 I-5> 대표 해외 논문	585
<표 첨부 I-6> 분야별 현 기술수준 (한국산업기술진흥원, 2009)	587
<표 첨부 I-7> 첨단 수자원 분야별 시장규모 및 변화 추이 (한국산업기술진흥원, 2009)	587
<표 첨부 I-8> 세계 물공급 시장 연간 투자비 소요액 및 투자재원 (Cosgrove and Rijsberman, 2000)	588
<표 첨부 I-9> 개발도상국의 연간 물분야 투자수요 (2002~2025년) (※ 자료 : World Water Council 외, “Financing Water For All”, 2003. 3)	588
<표 첨부 I-10> 산업화를 통한 기대효과 (단위 : 백만원)	589
<표 첨부 II-1> 김현영 (1988) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식	600
<표 첨부 II-2> 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case I)	600
<표 첨부 II-3> 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case II)	601
<표 첨부 II-4> 저수지 상류유역 모듈의 입력자료	602
<표 첨부 II-5> 저수지 상류유역 모듈의 출력자료	603
<표 첨부 II-6> 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수	605
<표 첨부 II-7> 농업용수 공급량 모듈의 입력자료	606
<표 첨부 II-8> 농업용수 공급량 모듈의 출력자료	606
<표 첨부 II-9> 저수지 물수지 모듈의 입력자료	609
<표 첨부 II-10> 저수지 물수지 모듈의 출력자료	610

그 립 목 차

(그림 1-1) 컴퓨터 기술 진보에 따른 모형의 발전 과정 (강문성 등, 2012)	3
(그림 1-2) 기후변화 및 그 영향	4
(그림 1-3) Object Modeling System 개념도	5
(그림 1-4) 농촌용수 종합해석 모형개발 개념도	6
(그림 1-5) 연구 추진 전략	12
(그림 1-6) 객체 모듈기반 모형 플랫폼 개념도	12
(그림 1-7) 연구 추진 체계도	13
(그림 1-8) 연구 추진 로드맵	13
(그림 2-1) 우리나라 수자원 이용량 (국토해양부, 2011)	25
(그림 2-2) 수리시설물별 수리답 면적 구성비 (농림축산식품부, 2014b)	25
(그림 2-3) 하천 유출량 및 저수지 유입량 전경	26
(그림 2-4) 농업용 저수지의 관개용수 공급 전경	26
(그림 2-5) 농업용 저수지의 물넘이 전경	27
(그림 2-6) 논의 담수, 포장 배수량 및 용수로 배수량 전경	28
(그림 2-7) 농업유역의 물순환 및 모의요소 모식도	29
(그림 2-8) 모형의 일반적 구분 (Chow et al., 1972)	30
(그림 2-9) 농촌용수 물순환 해석 모형의 용어 개념 관계도	52
(그림 2-10) Wrapper를 이용한 모형 간 연계	56
(그림 2-11) OpenMI를 이용한 컴포넌트 설계	56
(그림 3-1-1) COMFARM기반 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 구성	65
(그림 3-1-2) 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 출력 화면	66
(그림 3-1-3) 3단 Tank 모형의 구성도	67
(그림 3-1-4) TANK 모형 매개변수 추정 회귀식 개발 연구흐름도	69
(그림 3-1-5) 대상유역의 위치	70
(그림 3-1-6) 보정기간 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도	76
(그림 3-1-7) 검정기간 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도	77
(그림 3-1-8) TANK 모형 매개변수의 범위	80
(그림 3-1-9) 회귀식에 의한 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도	82
(그림 3-1-10) Case에 따른 유역경사 범위	83
(그림 3-1-11) 유역경사에 따른 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case I)	86
(그림 3-1-12) 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case I)	86
(그림 3-1-13) 유역경사에 따른 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case II)	89
(그림 3-1-14) 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case II)	89
(그림 3-1-15) 유역별 모형 모의능력 비교	90
(그림 3-1-16) SWAT 모형의 구성	93
(그림 3-1-17) 용담댐 유역의 지형자료	93

(그림 3-1-18) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유출량 비교	95
(그림 3-1-19) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유역별 산포도	96
(그림 3-1-20) 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유출량 비교	98
(그림 3-1-21) 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유역별 산포도	99
(그림 3-1-22) LOADEST의 입출력자료 (Runkel et al., 2004)	101
(그림 3-1-23) 대상유역의 위치	104
(그림 3-1-24) T-N 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도	107
(그림 3-1-25) T-N 부하량 LOADEST 모의치의 통계적 변량	107
(그림 3-1-26) T-P 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도	108
(그림 3-1-27) T-P 부하량 LOADEST 모의치의 통계적 변량	109
(그림 3-1-28) T-N 매개변수 추정결과에 의한 LOADEST 모의치의 통계적 변량	110
(그림 3-1-29) T-P 매개변수 추정결과에 의한 LOADEST 모의치의 통계적 변량	112
(그림 3-1-30) 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도	113
(그림 3-1-31) 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도	115
(그림 3-1-32) 청미천 유역의 총질소 연부하량	119
(그림 3-1-33) 청미천 유역의 총인 연부하량	120
(그림 3-2-1) COMFARM기반 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성	126
(그림 3-2-2) 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 화면 (1)	126
(그림 3-2-3) 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 화면 (2)	127
(그림 3-2-4) (a) 이동저수지 관개지구 위치, (b) 간선수로 시점부 전경, and (c) 수위-유량 관계 곡선	131
(그림 3-2-5) 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수의 상대 민감도 분석 결과	134
(그림 3-2-6) 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수의 민감도 지수 분석 결과	134
(그림 3-2-7) 보정기간 동안의 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교: (a) 순단위, (b) 월단위	136
(그림 3-2-8) : 보정기간 동안의 농업용수 공급량 산포도: (a) 순단위, (b) 월단위	136
(그림 3-2-9) 검정기간 동안의 월단위 농업용수 공급량 비교: (a) 시계열, (b) 산포도	137
(그림 3-2-10) 이동저수지의 연공급량 실측 결과, Type A 결과, Type B 결과, 그리고 최적 매개 변수 적용결과의 비교	139
(그림 3-2-11) 저수지 물수지 구성요소 및 관리수위	140
(그림 3-2-12) 저수지 내용적 모듈 구성요소	141
(그림 3-2-13) 수위-내용적 곡선 보유유무에 따른 수위-저수량 변환방식	141
(그림 3-2-14) 저수지 상류유출량 실측자료 보유유무에 따른 저수지 유입량 입력자료	142
(그림 3-2-15) 대상저수지의 위치 및 상류유역의 토지이용	147
(그림 3-2-16) 대상저수지의 표고별 면적 및 내용적 곡선 (한국농어촌공사, 2010)	148
(그림 3-2-17) 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수에 따른 민감도 분석 결과	152
(그림 3-2-18) 보정기간 동안의 실측치 및 모의치 시계열 비교 (Scheme I, II, III)	154
(그림 3-2-19) 보정기간 동안의 산포도 (Scheme I, II, III)	154
(그림 3-2-20) 검정기간 동안의 실측치 및 모의치 시계열 비교 (Scheme I, II, III)	156
(그림 3-2-21) 대상저수지의 월평균 물수지 분석 결과	157
(그림 3-3-1) COMFARM기반 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성	174

(그림 3-3-2) 저수지 하류유역 물순환 모형의 출력 화면	174
(그림 3-3-3) 수정 CREAMS-PADDY 모형의 구성	176
(그림 3-3-4) 수정 CREAMS-PADDY 수문 부모형의 입력부 화면 (1)	176
(그림 3-3-4) 수정 CREAMS-PADDY 수문 부모형의 입력부 화면 (2)	177
(그림 3-3-5) 수정 CREAMS-PADDY 영양물질 부모형 입력부 화면	177
(그림 3-3-6) 수정 CREAMS-PADDY 침식 부모형 입력부 화면	178
(그림 3-3-7) 수정 CREAMS-PADDY 모형의 EXCELTM 기반 출력 화면	178
(그림 3-3-8) 논에서의 물수지	179
(그림 3-3-9) 산화층 및 환원층에서의 반응 및 이동	183
(그림 3-3-10) 대상지구의 위치 및 모식도	191
(그림 3-3-11) 보정기간동안의 T-N, T-P 모의치 및 실측치 (A/B: 시간에 따른 변화 C/D: 산포도) ·	194
(그림 3-3-12) 검정기간동안의 T-N, T-P 모의치 및 실측치 (A/B: 시간에 따른 변화 C/D: 산포도) ·	195
(그림 3-3-13) 2009 ~ 2010년의 시나리오별 T-N부하량 모의결과	197
(그림 3-3-14) 2009 ~ 2010년의 시나리오별 T-P부하량 모의결과	197
(그림 3-3-15) 복합영농 관개지구의 수문순환 모식도 (송정현, 2013)	199
(그림 3-3-16) 논 광역 배수량의 구성 요소	200
(그림 3-3-17) 시설재배지의 지표 유출 과정	202
(그림 3-3-18) 양수장 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)	203
(그림 3-3-19) 취입보 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)	204
(그림 3-3-20) 관정 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)	204
(그림 3-3-21) 시설관리 손실률의 추정방법 (송정현, 2013)	205
(그림 3-3-22) 복합영농 관개지구 수문해석 모형의 적용 대상지구	206
(그림 3-3-23) 이동저수지 간선수로의 수위-유량 관계식	208
(그림 3-3-24) 이동저수지의 농업용수 공급량 (2001~2005)	208
(그림 3-3-25) 이동저수지의 농업용수 공급량 (2006~2009)	208
(그림 3-3-26) 용배수로의 수위 (UP1, UP2, 2011)	209
(그림 3-3-27) 용배수로의 수위 (DW1, DW2, DW3, 2011)	209
(그림 3-3-28) 용배수로의 수위 (UP1, UP2, 2012)	210
(그림 3-3-29) 용배수로의 수위 (DW1, DW2, DW3, 2012)	210
(그림 3-3-30) 순별 모의 필요수량과 농업용수 공급량의 상관관계	214
(그림 3-3-31) 농업용수 공급량의 모의치와 실측치의 비교	214
(그림 3-3-32) 입력 매개변수의 민감도 분석	215
(그림 3-3-33) 보정기간에 대한 모의치와 실측치의 비교	216
(그림 3-3-34) 검정기간에 대한 모의치와 실측치의 비교	217
(그림 3-3-35) 시설재배지 유출량 모형의 모의 결과 (2010~2011)	218
(그림 3-3-36) 대상 관개지구의 농업용수 공급량 및 배수량 모의 결과	219
(그림 3-3-37) 대상지구 모니터링 시스템 및 수위-유량 관계곡선	222
(그림 3-3-38) 대상지구 관개회귀수량 구성 요소의 일별 변화	223
(그림 3-3-39) 월별 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성요소의 관계	227

(그림 3-3-40) 하천 네트워크 해석 기반 유출량 추정기법	231
(그림 3-3-41) Tank 기반 지하수 유출량 모형의 개념	231
(그림 3-3-42) 이동저수지 유역의 유역도 및 토지이용도	232
(그림 3-3-43) 이동저수지 유역의 하천 네트워크	232
(그림 3-3-44) 2011 ~ 2012년 이동저수지 기상자료	233
(그림 3-3-45) 농업용 저수지 유역의 모형 보정 방법	234
(그림 3-3-46) 저수지 물수지 모형의 보정 및 검정 결과	235
(그림 3-3-47) 이동저수지 물수지 분석 결과	235
(그림 3-3-48) 하천 네트워크 해석 기반 수문 모형의 보정 및 검정결과	235
(그림 3-4-1) Flowchart of SCE-UA Algorithm (Duan et al., 1992)	242
(그림 3-4-2) 유전자 알고리즘 순서도 (http://www.ewh.ieee.org)	242
(그림 3-4-3) Ant Colony Optimization 최적화 과정	243
(그림 3-4-4) PSO의 최적화 과정	244
(그림 3-4-5) Simulated Annealing 모식도 (Chang et al., 2006)	244
(그림 3-4-6) 최적화 모듈의 화면 및 구성	252
(그림 3-4-7) 최적화 모듈과 스크립트 문의 연계	253
(그림 3-4-8) 최적화 모듈에서의 제약조건의 설정 화면	253
(그림 3-4-9) 유전자 알고리즘기법에서 세대에 따른 목적함수의 변화	254
(그림 3-4-10) 최적화 기법 모듈의 수정 3단 Tank 모형 적용 결과 (홍성유역, 2003-2007)	254
(그림 3-4-11) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 보정결과	255
(그림 3-4-12) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 산포도	256
(그림 3-4-13) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 검정결과	257
(그림 3-4-14) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 모의치와 실측치의 산포도	257
(그림 3-4-15) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 모의치와 실측치의 산포도	258
(그림 3-4-16) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 보정결과	259
(그림 3-4-17) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 검정결과	259
(그림 3-4-18) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 모의치와 실측치의 산포도	260
(그림 3-5-1) 기후변화 시나리오에 따른 저수지 물수지 해석 지원기술	264
(그림 3-5-2) 기후변화에 따른 저수지 물수지 요소	266
(그림 3-5-3) 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 변화	268
(그림 3-5-4) 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석 지원 기술	269
(그림 3-6-1) 자바(Java) 구성 요소 (출처 : Oracle 홈페이지)	274
(그림 3-6-2) 이클립스 플랫폼의 구성 (출처 : 이클립스 홈페이지)	275
(그림 3-6-3) 이클립스 IDE 실행화면	275
(그림 3-6-4) 레고플레이트와 레고블럭 기반 작품 제작	276
(그림 3-6-5) 초기화면	276
(그림 3-6-6) 객체화된 모듈들	276
(그림 3-6-7) 플랫폼 모듈 plug-in 및 시스템화	276
(그림 3-6-8) 모듈아바타	277

(그림 3-6-9) 모듈 정보 표시화면	277
(그림 3-6-10) 모듈의 유형 예시	278
(그림 3-6-11) Blank 플랫폼 화면	278
(그림 3-6-12) Blank 플랫폼 화면	279
(그림 3-6-13) 저수지 유입량 모듈 실행	280
(그림 3-6-14) 범용차트 모듈 실행	280
(그림 3-6-15) 기존 등록된 모듈 생성	281
(그림 3-6-16) 사용자가 개발한 신규 모듈 생성	281
(그림 3-6-17) 개별모듈 이동 및 제거	282
(그림 3-6-18) 개별모듈 정보	282
(그림 3-6-19) 개별모듈 실행	283
(그림 3-6-20) 저장화면	283
(그림 3-6-21) 전체 모듈의 조합을 통한 물수지 분석	285
(그림 3-6-22) 범용입력모듈	289
(그림 3-6-23) 범용 출력 모듈 (1)	290
(그림 3-6-24) 범용 출력 모듈 (2)	291
(그림 3-6-25) 모듈 등록 예	292
(그림 3-6-26) 모듈 복제 상세 화면	293
(그림 3-6-27) 유역 유입량 분석 모듈 복제 예	293
(그림 3-7-1) OpenMI기반 모형의 개발 과정	298
(그림 3-7-2) OpenMI의 주요 모듈	299
(그림 3-7-3) COMFARM의 기본 개념	300
(그림 3-7-4) COMFARM을 통한 맞춤형 모형 구축	301
(그림 3-7-5) COMFARM의 아키텍처	302
(그림 3-7-6) COMFARM 기반 농촌용수 물순환 해석 시스템	305
(그림 3-7-7) 저수지 상류유역 Interface 구성	307
(그림 3-7-8) 저수지 물수지 Interface 구성	308
(그림 3-7-9) 농업용수 공급량 Interface 구성	308
(그림 3-7-10) 저수지 하류유역 Interface 구성	309
(그림 3-7-11) Use-Case 다이어그램	310
(그림 3-7-12) 세부 컴포넌트의 연관관계	312
(그림 3-7-13) 2단 계층 그룹화	312
(그림 3-7-14) 수정 3단 Tank 모형 설계서	313
(그림 3-7-15) 저수지 물수지 모형 설계서	314
(그림 3-7-16) 농업용수 공급량 모형 설계서	314
(그림 3-7-17) COMFARM 프로그램의 (a) Project Tree, (b) Main Menu, (c) Module Bar, 그리고 (d) Workspace Window.	315
(그림 3-7-18) COMFARM 기반 객체 모듈 및 물순환 해석 응용	316
(그림 3-7-19) 저수지 상류유역 해석 컴포넌트	316

(그림 3-7-20) 저수지 물수지 해석 컴포넌트	317
(그림 3-7-21) 저수지 하류 관계지구 컴포넌트	317
(그림 3-8-1) 수원 기상관측소 월별 평균 강수량 (1981-2010)	321
(그림 3-8-2) 수원 기상관측소 월별 평균 기온 (1981-2010)	322
(그림 3-8-3) 수원 기상관측소 월별 평균 풍속 (1981-2010)	322
(그림 3-8-4) 수원 기상관측소 월별 평균 상대 습도 (1981-2010)	323
(그림 3-8-5) 수원 기상관측소 월별 평균 태양 복사량 (1981-2010)	323
(그림 3-8-6) 이동저수지 유역 DEM	324
(그림 3-8-7) 이동저수지 유역 수계망도	325
(그림 3-8-8) 이동저수지 유역 토지이용도	325
(그림 3-8-9) 이동저수지 유역 토양도	326
(그림 3-8-10) 이동저수지 유역 수문학적 토양군도	327
(그림 3-8-11) 이동저수지 유역 음영기복도, 향분석도, 경사분석도	327
(그림 3-8-12) NPD-#1 지점의 유량	328
(그림 3-8-13) NPD-#2 지점의 유량	328
(그림 3-8-14) 지점별 수위-유량 관계곡선	329
(그림 3-8-15) NWS-#1 지점의 유량	329
(그림 3-8-16) NWS-#3 지점의 유량	330
(그림 3-8-17) NWS-#4 지점의 유량	330
(그림 3-8-18) NWS-#5 지점의 유량	330
(그림 3-8-19) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (pH) (2013)	334
(그림 3-8-20) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (EC) (2013)	335
(그림 3-8-21) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (T-N) (2013)	335
(그림 3-8-22) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (T-P) (2013)	335
(그림 3-8-23) 개체관계도	338
(그림 3-8-24) 농촌용수종합정보 데이터베이스	338
(그림 3-8-25) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 구조	339
(그림 3-8-26) 자료 입력 모듈	340
(그림 3-8-27) 청미천 상류유역과 근삼리 유역의 모니터링 시스템	341
(그림 3-8-28) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 메인 메뉴: (a)지점 목록; (b) 지점 속성; (c)대상유역 지도	342
(그림 3-8-29) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 입력 모듈	343
(그림 3-8-30) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 분석 모듈	343
(그림 3-8-31) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 출력 모듈	344
(그림 3-8-32) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT)의 구조	345
(그림 3-8-33) GIS의 기본적 성분과 환경 (박승우, 2000)	348
(그림 3-8-34) 자료 전처리 과정	351
(그림 3-8-35) 빈도분석 과정	352
(그림 3-8-36) 증발산량 산정 과정	353

(그림 3-8-37) 유역 유출량 모형 연계 기법	354
(그림 3-8-38) 농업용수 공급량 해석 모형 연계 기법	354
(그림 3-8-39) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT) 웹 페이지 메인화면, (a): 자료 표준화 시스템의 메인 메뉴 구성 화면, (b): 자료 표준화 시스템에 대한 설명 및 시스템에 대한 설명 화면, (c): 농촌유역에 대한 지도 화면	355
(그림 3-8-40) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT) 웹 페이지 세부화면	356
(a): 기상 자료에 대한 세부 메뉴 화면, (b): 전처리를 수행한 기상 자료에 대한 그래프 화면 ..	356
(그림 3-9-1) 농촌용수 종합시험지구 위치도 (이동지구)	360
(그림 3-9-2) 점진제 용수계통도	363
(그림 3-9-3) 연구원 시험포장 정보	364
(그림 3-9-4) 우즈베키스탄 행정구역도	365
(그림 3-9-5) 주요 기상관측소 위치	367
(그림 3-9-6) 지역별 토양 분포도	370
(그림 3-9-7) 이동지구 지점별 일별강우량 및 누가강우량	375
(그림 3-9-8) 이동지점 연도별 누가강우량 및 일별 강우량	375
(그림 3-9-9) 누가강우량 전년도 비교	376
(그림 3-9-10) 동진지점 월 강우량	377
(그림 3-9-11) 동진지점 일 강우량	378
(그림 3-9-12) 저수지 일별 수위변화	378
(그림 3-9-13) 저수지 일별 저수율 변화	378
(그림 3-9-14) 유각천 및 금평저수지 유역 현황도	380
(그림 3-9-15) 금평저수지 유역 특성	381
(그림 3-9-16) 금평저수지 표고별 면적 내용적 곡선	383
(그림 3-9-17) 금평저수지 유역 내 토지이용 현황도	383
(그림 3-9-18) 금평저수지 수위 변화 (2012.1 - 2013.12)	384
(그림 3-9-19) 금평저수지 하류부 금평수로 수위 변화	384
(그림 3-9-20) 두월천 및 대화저수지 유역 현황도	385
(그림 3-9-21) 대화저수지 유역 특성	387
(그림 3-9-22) 대화저수지 표고별 면적 및 내용적 곡선	388
(그림 3-9-23) 대화저수지 유역 내 토지이용 현황도	389
(그림 3-9-24) 대화저수지 수위 변화 (2012.1 - 2013.12)	390
(그림 3-9-25) 대화저수지 하류부 금평수로 수위 변화	390
(그림 3-9-26) 동진지구내 수위자료	391
(그림 3-9-27) 이동지구의 강우관측소 위치	391
(그림 3-9-28) 이동강우관측소과 이동우량관측소 강우량의 1:1 비교	392
(그림 3-9-29) 용덕강우관측소와 이동우량관측소 강우량 1:1 비교	393
(그림 3-9-30) 미산강우관측소와 이동우량관측소 강우량의 1:1 비교	394
(그림 3-9-31) 은산강우관측소과 진위우량관측소 강우량의 1:1 비교	395
(그림 3-9-32) 용덕저수지 용수간선 일평균 수위	397

(그림 3-9-33) 용덕저수지 용수간선 일평균 유량	397
(그림 3-9-34) 2002년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	397
(그림 3-9-35) 2003년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	398
(그림 3-9-36) 2004년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	398
(그림 3-9-37) 2005년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	398
(그림 3-9-38) 미산저수지 용수간선 일평균 수위	400
(그림 3-9-39) 미산저수지 용수간선 일평균 유량	400
(그림 3-9-40) 2002년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	400
(그림 3-9-41) 2003년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	401
(그림 3-9-42) 2004년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	401
(그림 3-9-43) 2005년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	401
(그림 3-9-44) 이동저수지 용수간선 일평균 수위	402
(그림 3-9-45) 이동저수지 용수간선 일평균 유량	402
(그림 3-9-46) 2002년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	403
(그림 3-9-47) 2003년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	403
(그림 3-9-48) 2004년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	404
(그림 3-9-49) 2005년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교	404
(그림 3-9-50) 미산교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교	405
(그림 3-9-51) 묵방교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교	405
(그림 3-9-52) 덕성교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교	406
(그림 3-9-53) 재인교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교	407
(그림 3-9-54) 동진지구 관개수로 (간선 및 지선) 및 계측지점 현황 (남원호 등, 2013)	408
(그림 3-9-55) 지선별 수위-유량 관계곡선 (최진규 등, 2012)	409
(그림 3-9-56) 동진지구내 화호지선 시점 및 말단 수위 비교	410
(그림 3-9-57) 동진지구내 대평지선 시점 및 말단 수위 비교	410
(그림 3-9-58) 동진지구내 감곡지선 시점 및 말단 수위 비교	411
(그림 3-9-59) 동진지구내 용성지선 시점 및 말단 수위 비교	411
(그림 3-9-60) 동진지구내 종신지선 시점 및 말단 수위 비교	411
(그림 3-9-61) 동진지구내 화호지선 시점 및 말단 유량 비교	412
(그림 3-9-62) 동진지구내 대평지선 시점 및 말단 유량 비교	412
(그림 3-9-63) 동진지구내 감곡지선 시점 및 말단 유량 비교	412
(그림 3-9-64) 동진지구내 용성지선 시점 및 말단 유량 비교	412
(그림 3-9-65) 동진지구내 종신지선 시점 및 말단 유량 비교	413
(그림 3-9-66) 동진지구내 화호지선 농업용수 공급량 비교	413
(그림 3-9-67) 동진지구내 대평지선 농업용수 공급량 비교	413
(그림 3-9-68) 동진지구내 감곡지선 농업용수 공급량 비교	413
(그림 3-9-69) 동진지구내 신용지선 농업용수 공급량 비교	413
(그림 3-9-70) 동진지구내 용성지선 농업용수 공급량 비교	414
(그림 3-9-71) 동진지구내 죽산지선 농업용수 공급량 비교	414

(그림 3-9-72) 영상 변환의 기준점 (Fujita et al., 1998)	417
(그림 3-9-73) 시공간영상분석법(Fujita et al., 2005)	418
(그림 3-9-74) CASTI의 개념도(김서준 등, 2013)	419
(그림 3-9-75) OS별 스마트폰 시장 점유율 변화	420
(그림 3-9-76) 제조사별 국내 스마트폰 점유율	420
(그림 3-9-77) 스마트폰 영상유속계에 의한 유속 산정 개요도	422
(그림 3-9-78) 표면영상유속계의 분석 흐름도	423
(그림 3-9-79) 촬영 화면의 구조	423
(그림 3-9-80) 동영상의 프레임 분리와 시공간영상 만들기	424
(그림 3-9-81) CASTI의 원리	424
(그림 3-9-82(a)) 측정선의 방향	425
(그림 3-9-82(b)) 시공간영상의 개념	425
(그림 3-9-83) 계측 결과의 도시	427
(그림 3-9-84) 인공영상에 의한 CASTI 영상 분석 시험	429
(그림 3-9-85) 오차의 분포	429
(그림 3-9-86) 실험경우별 영상	431
(그림 3-9-87) 실험 수로의 측정 유속	433
(그림 3-9-88) 표면영상유속계에 의한 유속 측정 결과	434
(그림 3-9-89) 고유속시 측정 유속과 영상유속	435
(그림 3-9-90) 중유속시 측정 유속과 영상유속	436
(그림 3-9-91) 저유속시 측정 유속과 영상유속	436
(그림 3-10-1) 대상저수지의 표고별 내용적 곡선	440
(그림 3-10-2) 대화저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	442
(그림 3-10-3) 대화저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	443
(그림 3-10-4) 대화저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	443
(그림 3-10-5) 금평저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	444
(그림 3-10-6) 금평저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	445
(그림 3-10-7) 금평저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	445
(그림 3-10-8) 당월저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	446
(그림 3-10-9) 당월저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	446
(그림 3-10-10) 당월저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	447
(그림 3-10-11) 선암저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	448
(그림 3-10-12) 선암저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	448
(그림 3-10-13) 선암저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교	448
(그림 3-10-14) 화호지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	450
(그림 3-10-15) 화호지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	451
(그림 3-10-16) 화호지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	451
(그림 3-10-17) 대평지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	452
(그림 3-10-18) 대평지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	452

(그림 3-10-19) 대평지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	453
(그림 3-10-20) 감곡지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	454
(그림 3-10-21) 감곡지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	454
(그림 3-10-22) 감곡지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	454
(그림 3-10-23) 신용지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	455
(그림 3-10-24) 신용지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	456
(그림 3-10-25) 신용지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	456
(그림 3-10-26) 용성지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	457
(그림 3-10-27) 용성지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	457
(그림 3-10-28) 용성지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	458
(그림 3-10-29) 종신지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)	459
(그림 3-10-30) 종신지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)	459
(그림 3-10-31) 종신지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도	459
(그림 3-10-32) 대화저수지의 월별 물수지 분석 결과	460
(그림 3-10-33) 금평저수지의 월별 물수지 분석 결과	461
(그림 3-10-34) 당월저수지의 월별 물수지 분석 결과	462
(그림 3-10-35) 선암저수지의 월별 물수지 분석 결과	463
(그림 3-10-36) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (화호지선, 2012)	464
(그림 3-10-37) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (화호지선, 2013)	465
(그림 3-10-38) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (대평지선, 2012)	465
(그림 3-10-39) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (대평지선, 2013)	466
(그림 3-10-40) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (감곡지선, 2012)	466
(그림 3-10-41) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (감곡지선, 2013)	467
(그림 3-10-42) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (신용지선, 2012)	468
(그림 3-10-43) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (신용지선, 2013)	469
(그림 3-10-44) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (용성지선, 2012)	469
(그림 3-10-45) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (용성지선, 2013)	470
(그림 3-10-46) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (종신지선, 2012)	471
(그림 3-10-47) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (종신지선, 2013)	471
(그림 3-10-48) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 1)	475
(그림 3-10-49) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 2)	476
(그림 3-10-50) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 3)	477
(그림 3-10-51) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 4)	478
(그림 3-10-52) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 5)	479
(그림 3-10-53) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 6)	480
(그림 5-1) 출원번호통지서	503
(그림 5-2) 게재 확정된 SCI 논문	504
(그림 5-3) 게재된 KCI 논문	505
(그림 5-4) 게재된 학술기사	509

(그림 5-5) 수질모델링의 이해 및 적용	511
(그림 5-6) 논문상 수상 실적	511
(그림 5-7) 지능형 홍수관리 해석 Framework 개발 추진전략	514
(그림 6-1) SWAT 모형의 구성	518
(그림 6-2) HSPF 모형의 구조 (Bicknell et al., 1996)	518
(그림 6-3) SWMM 블록 사이의 관계 (Huber and Dickinson, 1988)	519
(그림 6-4) GWLF 모형의 구조 (황세운, 2006)	520
(그림 6-5) Hydro-BEAM 모형의 모식도 (Ikebuchi et al., 2006)	521
(그림 6-6) HEC-HMS모형의 세부 모듈 (성충현, 2004)	521
(그림 6-7) HEC-RAS 모형의 하천 수위 모의 모식도 (황순호, 2012)	522
(그림 6-8) EU WFD의 개념 (EC Joint Research Centre)	523
(그림 6-9) 호주 ARMS 개념도 (HydroNumerics 홈페이지)	524
(그림 6-10) GF Framework의 구성 (Tacke et al., 2001)	534
(그림 6-11) 추가 컴포넌트를 이용한 GF Framework (Tacke et al., 2001)	535
(그림 6-12) Framework와 Framework 컴포넌트 계층도 (Tacke et al., 2001)	535
(그림 6-13) GF의 물리적 도메인 (HarmonIT, 2002)	535
(그림 6-14) GF의 모델링 및 모의화면 (HarmonIT, 2002)	536
(그림 6-15) OMS의 구조 (HarmonIT, 2002)	536
(그림 6-16) ICMS의 객체연결 (HarmonIT, 2002)	537
(그림 6-17) TIME 구조 (Murray et al., 2006)	537
(그림 6-18) TIME을 이용한 개발과정 (Murray et al., 2006)	538
(그림 6-19) TIME을 이용하여 개발한 모형의 예 (Murray et al., 2006)	538
(그림 6-20) Open MI를 응용하는 일반적 구조 (Moore et al., 2010)	539
(그림 6-21) OpenMI 이용 모형 간 연계 (Moore et al., 2010)	539
(그림 6-22) OpenMI의 자료 처리 과정 (Moore et al., 2010)	540
(그림 7-1) 농어촌연구원 시험지구 위치	548
(그림 7-2) 농어촌연구원 시험지구 용배수로 모식도	548
(그림 7-3) 농어촌연구원 시험지구 계측기 위치	549
(그림 7-4) 농촌용수 모니터링 시험지구 서버 연계	550
(그림 8-1) 본 연구 참여연구원 환경안전교육 수료 현황	552
(그림 8-2) 실험실 안전관리시스템 웹페이지	552
(그림 8-3) 실험실 안전점검표 (1. 일반사항)	552
(그림 첨부 I-1) 실시간물관리 운영시스템 모델 연계도	586
(그림 첨부 II-1) COMFARM의 기본개념	593
(그림 첨부 II-2) COMFARM 아키텍처	596
(그림 첨부 II-3) COMFARM 기반 농촌용수 물순환 해석 시스템	597
(그림 첨부 II-4) 3단 Tank 모형의 구성도	598
(그림 첨부 II-5) 저수지 물수지 구성요소 및 관리수위	607
(그림 첨부 II-6) ORACLE Software Downloads	611

(그림 첨부 II-7) Java SE Download	612
(그림 첨부 II-8) Java SE 6	612
(그림 첨부 II-9) Java SE Development Kit	612
(그림 첨부 II-10) OS에 맞는 Java 버전 선택	613
(그림 첨부 II-11) Oracle 로그인	613
(그림 첨부 II-12) Java 설치파일 저장	613
(그림 첨부 II-13) Java 설치파일 실행	613
(그림 첨부 II-14) JDK 6 setup	613
(그림 첨부 II-15) JDK custom setup	613
(그림 첨부 II-16) JDK 6 change location	614
(그림 첨부 II-17) JDK 6 changed location	614
(그림 첨부 II-18) JDK 6 install	614
(그림 첨부 II-19) JRE change location	614
(그림 첨부 II-20) JDK 6 브라우저 닫기	614
(그림 첨부 II-21) JDK 6 install Complete	614
(그림 첨부 II-22) 제어판 -> 시스템	615
(그림 첨부 II-23) 고급 시스템 설정	615
(그림 첨부 II-24) 고급 시스템 -> 고급 탭	615
(그림 첨부 II-25) 고급 시스템 -> 고급 탭	615
(그림 첨부 II-26) 시스템 변수 편집	616
(그림 첨부 II-27) 윈도우 실행 창	616
(그림 첨부 II-28) 환경변수 설정 PATH 확인	616
(그림 첨부 II-29) javac 설정 확인	616
(그림 첨부 II-30) COMFARM 메인화면	617
(그림 첨부 II-31) COMFARM 메인화면	618
(그림 첨부 II-32) 명칭 입력	619
(그림 첨부 II-33) 프로젝트 목록	619
(그림 첨부 II-34) 프로젝트 열기	619
(그림 첨부 II-35) MenuBar	620
(그림 첨부 II-36) 신규 프로젝트 생성 후 화면	620
(그림 첨부 II-37) 모듈리스트	621
(그림 첨부 II-38) 모듈 생성	621
(그림 첨부 II-39) 메뉴트리 모듈 등록	622
(그림 첨부 II-40) 모듈 등록 예	623
(그림 첨부 II-41) 모듈 복제 상세 화면	624
(그림 첨부 II-42) 유역유입량분석 모듈 복제 예	625
(그림 첨부 II-43) 마우스 드래그로 모듈 이동	625
(그림 첨부 II-44) 드래그하여 모듈 제거	626
(그림 첨부 II-45) 모듈 실행 영역	626

(그림 첨부 II-46) 범용차트 모듈의 실행화면	627
(그림 첨부 II-47) 모듈정보확인 영역	627
(그림 첨부 II-48) 모듈정보표출	627
(그림 첨부 II-49) 입출력 데이터	628
(그림 첨부 II-50) 데이터 존재 유무확인	628
(그림 첨부 II-51) 범용모듈 데이터 연결	629
(그림 첨부 II-52) 한글/영어 선택	629
(그림 첨부 II-53) 한글을 선택했을 경우 화면	630
(그림 첨부 II-54) 영어를 선택했을 경우 화면	630
(그림 첨부 II-55) MenuBar	631
(그림 첨부 II-56) 저장파일 다이얼로그	631
(그림 첨부 II-57) MenuBar	631
(그림 첨부 II-58) 위치변경 파일 다이얼로그	631
(그림 첨부 II-59) 유역유출량 분석	632
(그림 첨부 II-60) 유역특성 입력자료	633
(그림 첨부 II-61) Tank모형 매개변수 입력	634
(그림 첨부 II-62) 기상자료 입력	634
(그림 첨부 II-64) 일별유출량 결과	636
(그림 첨부 II-65) 저수지 유입량 그래프 결과	636
(그림 첨부 II-66) 저수지 유입량 그래프(범용차트) 결과	637
(그림 첨부 II-67) 농업용수 공급량 분석	638
(그림 첨부 II-68) 기상 입력자료	638
(그림 첨부 II-69) 농업용수 공급량 입력자료	639
(그림 첨부 II-70) 작물계수 입력자료	639
(그림 첨부 II-71) 농업용수 공급량 분석 실행 모듈	640
(그림 첨부 II-72) 농업용수 공급량 모의 결과	640
(그림 첨부 II-73) 생육기별 공급량 모의 결과	641
(그림 첨부 II-74) 필요수량 그래프	641
(그림 첨부 II-75) 농업용수 공급량 그래프	642
(그림 첨부 II-76) 저수지 물수지 분석	643
(그림 첨부 II-77) 일별 연속유입 입력자료	644
(그림 첨부 II-78) 저수지 내용적 곡선 입력자료	644
(그림 첨부 II-79) 기상자료 입력자료	645
(그림 첨부 II-80) 초기 저수위 입력자료	645
(그림 첨부 II-81) 농업용수 공급량 모의결과 입력자료	646
(그림 첨부 II-82) 저수지 물수지 분석 실행 모듈	646
(그림 첨부 II-83) 저수지 물수지 그래프	647
(그림 첨부 II-84) 저수지 물수지 결과	648
(그림 첨부 II-85) 저수지 물수지 결과 (범용차트)	648

(그림 첨부 II-86) 범용입력모듈	649
(그림 첨부 II-87) 범용차트모듈 설정	650
(그림 첨부 II-88) 범용차트모듈 실행화면	652
(그림 첨부III-1) 농촌용수 해석 모형 현황	653
(그림 첨부III-2) 농촌용수 해석 모형 개발방향	654
(그림 첨부III-3) 기존 모형 활용	654
(그림 첨부III-4) 모형의 국내 신규 개발	656
(그림 첨부III-5) 개발모형의 시·공간적 규모	656
(그림 첨부III-6) 수문요소 산정 모형	656
(그림 첨부III-7) 수질 모형	657

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 서 론

수문·수리·수질과 관련된 물순환 해석모형은 다양한 공간적 규모 (point, field, and watershed scales)에 대한 수문순환, 수리학적 거동 그리고 오염물질 기작 및 이송 과정 등의 자연현상을 수학적으로 표현한 도구이다 (강문성, 2008; 강문성과 김철겸 2009; 강문성 등, 2012; 강문성 등, 2015). 이러한 물순환 모형은 과거 40년 동안 다양한 공간적 규모 (point, field, and watershed scales)에 대한 수문순환, 수리학적 거동 그리고 오염물질 기작 및 이송 과정을 모의하기 위하여 개발되어져 왔다 (Srivastava et al., 2007; 강문성 등, 2015).

물순환 해석모형은 수문·수질, 모델링 구성요소 및 기법, 시간적 범위, 유역 특성, 초과 강우량 모의 기법, 지표 유출량 모의 기법, 지표하 유출량 모의 기법, 하도에서의 유출량 모의 기법, 저수지 내 물순환 모의 기법, 지표 토양유실량 모의 기법, 하도내 토사 이송 모의 기법, 저수지 토사 이송 모의 기법, 화학성분 모의 기법, 최적관리기법 적용 및 평가 가능 여부 등에 따라 서로 다른 수문순환계와 오염물질 운송 기작을 갖고 있으며, 적용 대상지의 특성과 그 범위도 사뭇 다르다고 할 수 있다.

물순환 해석모형들의 지속적인 개발과 응용은 지리정보시스템 (geographic information system, GIS), 전문가 시스템 (expert system), 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 기법 (object-oriented modeling system, OOM), 원격탐사 (remote sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수문·수질모형과 통합하기 위한 사용자 중심의 종합적인 통합 시스템으로의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이와 더불어 모형의 매개변수의 불확실성의 특징을 구명할 수 있는 효율적인 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한, 컴퓨팅 기술의 진보로 고도의 계산이 가능해짐에 따라 추계적 모형 및 결정론적 모형과 추계적 모형의 병용 모형 개발 등의 연구도 지속적으로 진행되고 있고, 기능성과 응용성을 확대해 나가기 위한 노력이 지속되고 있다.

한편, 물순환 해석모형의 정확도를 증가시키기 위해서는 여러 가지 물리적인 기작이나 고차원을 고려하는 것이 필요하지만 이는 모형의 복잡성을 증가시키고 모형의 안정성을 저하시킬 수 있다 (강문성 등, 2012). 최근에는 컴퓨터 기술의 발전으로 인해 처리속도 증가는 어느 정도의 복잡성을 해결하는 역할을 하고 있고, 실제 모형도 3차원을 고려하고 물리적인 기작도 더 많이 고려하는 경향이 있다. 특히, 유역단위에서의 모형 구동에서는 많은 불확실성이 존재하는 만큼 모의 기작의 정확한 구축도 중요한 요소지만, 모형의 개발 내지는 적용 목적에 부합하면서도 사용의 편의성을 고려하는 것 또한 매우 중요한 요인이라 하겠다. 따라서 각 모의 요소에 대한 기법을 선정하는 경우 모형의 복잡성 내지는 정확성과 사용의 편의성을 고려하여 상호간 균형이 잘 이루어지도록 적용 기법을 선정하거나 개발하는 것이 필요하다고 하겠다.

컴퓨터 기술 발전과 더불어 우리가 직면하는 문제의 복잡성 또한 증가하고 있다. 농촌 유역의 모델링에 있어서도 다양한 요소들을 포함하는데, 여기에는 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회·경제적인 요소를 포괄하고 있다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라

발생하는 문제도 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 모형도 능동적으로 구축될 필요성이 있다.

물순환 과정은 지역적 조건에 따라 다르게 나타나며, 이에 따라 모의 요소와 해석 기법도 다르다. 우리나라 농업 유역은 논, 용·배수로, 그리고 농업용 저수지가 존재하며, 이는 국외에서 개발된 모형의 지역·환경적 조건과 다르다. 또한, 논 및 저수지에서의 물관리 방식 등 인위적 요소 또한 국외 조건과 다르다. 특히, 농촌유역 모델링에 있어 논/저수지의 물관리 방식에 따라 저수지 월류량, 관개지구 배수량, 그리고 하류 하천유량 등의 모의 결과는 크게 달라질 수 있다. 하지만 미국 및 유럽에서 개발된 농업유역 모형은 지역적 조건 뿐만 아니라 인위적 요소 또한 다르기 때문에 국내 적용에 한계가 있다 (송정헌 등, 2013a; 송정헌 등 2015a; 송정헌 등, 2015b).

국내에서는 농업용 수리구조물 설계 등에 HOMWRS (Hydrologic Operation Model for Water Resources System)가 주로 사용되고 있으나, 과거에 개발된 이후로 수정/개선되지 않아 제한수위 운영과 연단위 관개효율 변화, 중간낙수 시기의 공급 중단 기작 등이 반영되지 않았으며, TANK 모형의 매개변수 추정식 또한 개발 이후로 개선되지 않았다. 또한, 농촌용수 물순환의 중요 요소인 관개지구 배수량, 하류 하천유량, 지하수 유출량, 그리고 오염부하량 등을 모의할 수 없다. 이외에 기상청 제원 입력/매개변수 입력에 한계가 나타나며, 오류 발생시 프로그램이 강제 종료되고, 출력 파일에 단위가 기재되지 않는 등 전/후처리 시스템의 개선이 필요한 것으로 나타나고 있다.

기 개발된 국내외 모형이나 시스템은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 해석하는데 한계가 있으며, 컴퓨터 기술 발전에도 불구하고 농촌용수 해석이 직면하는 문제의 복잡성은 광범위한 요소가 포함되고 있어 가중되고 있으며, 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모형 형태의 객체지향 모델링 시스템 구축이 필요하다. 따라서 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 농촌용수의 용수구역 단위의 종합적인 해석 요소기술의 개발이 필요하며, 이를 위한 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 객체 모듈/컴포넌트 개발 및 동적 모의 플랫폼/Framework 개발 및 그에 따른 적용성 평가 및 실용화 방안이 수립되어야 할 것이다.

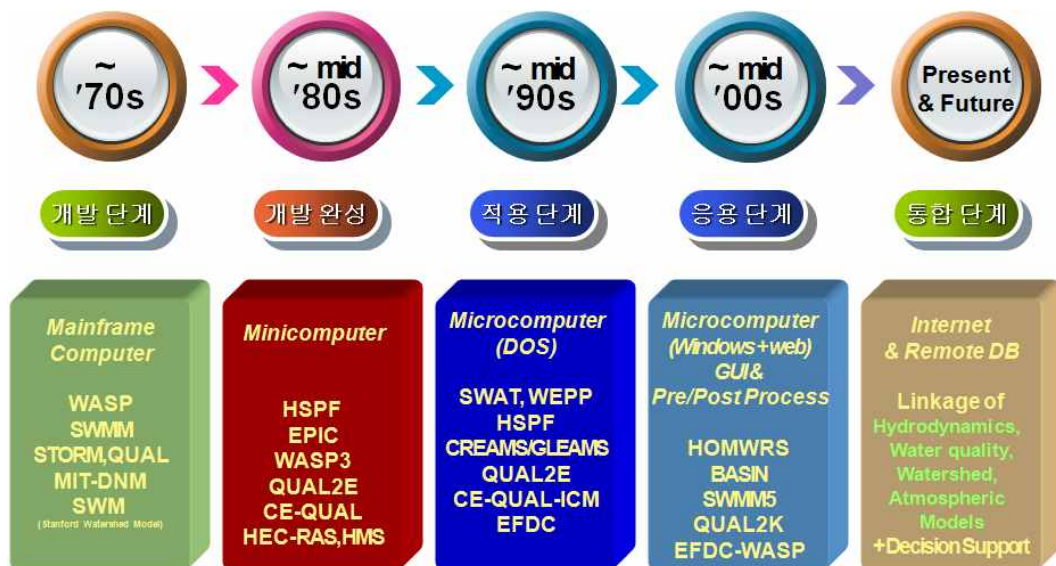
본 연구사업 (2012년 8월 10일 - 2015년 8월 9일)의 최종목표는 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여, ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 기술 및 모듈 개발, ② 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 Framework 및 동적 모의 플랫폼 개발, ③ 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안 등을 통하여 농촌수자원의 체계적·과학적 해석 및 관리 시스템을 개발하는데 있다.

본 장에서는 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”의 전반적인 연구배경과 그 필요성, 기존 연구의 한계 및 문제점과 향후 전망, 연구개발 최종 목표 및 주요 내용을 살펴보고, 연차별 연구개발 목표 및 내용, 연구사업 추진방법 및 체계, 최종 보고서 체계 및 구성, 연구성과 목표 대비 실적, 그리고 자문결과 등을 정리하고자 한다.

제 2 절 연구의 배경

수문·수리·수질 해석 모형은 과거 40년 동안 다양한 공간적 규모 (point, field, and watershed scales)에 대한 수문순환, 수리학적 거동 그리고 오염물질 기작 및 이송 과정을 모의하기 위하여 개발되어져 왔다 (Srivastava et al., 2007). 수문·수리·수질 모형의 개발은 1970년대에 본격화되어 1980년대에 현재 이용되고 있는 대부분의 모형이 완성되었다. 이러한 모델링 기법은 1990년대 이후 지리정보시스템 (geographic information system, GIS)의 응용과 수문해석 및 오염총량제 실시 등에 따라 도시 및 농촌유역에서의 수문순환 및 비점원오염의 추정과 관리방안에 따른 발생량과 배출량의 저감을 계량화하기 위한 도구로서 발전되었다 (박승우, 2006; 강문성과 김철겸, 2009; 강문성 등, 2012).

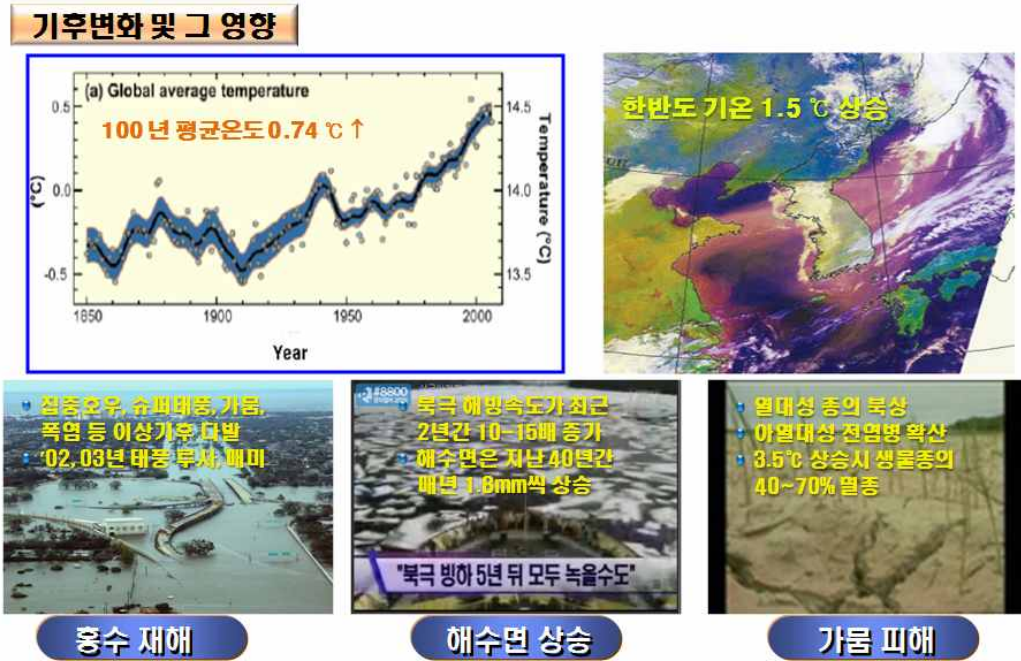
이러한 모형들의 지속적인 개발과 응용은 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 성능 및 기술의 향상으로 수문·수질 모델링과 관련된 연구가 가속화하고 있다. 최근에는 지리정보시스템, 전문가 시스템 (expert system), 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 기법 (object-oriented modeling system, OOM), 원격탐사 (remote sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수문·수질 모형과 통합하기 위한 시스템 개발과 적용성 평가 등의 연구가 활발히 시도되고 있다 (강문성과 김철겸, 2009; 강문성 등, 2012). (그림 1-1)은 컴퓨터 기술 진보에 따른 물순환 모형 및 통합시스템의 발전 과정을 보여주고 있다.



(그림 1-1) 컴퓨터 기술 진보에 따른 모형의 발전 과정 (강문성 등, 2012)

한편, 지구온난화와 이에 따른 기상변화는 최근 기상과학 및 환경공학 분야의 화두로 거론되고 있으며, 21세기에 들어서는 기후변화 저감 및 적응전략 수립을 위한 실질적인 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Ludwig et al., 2009; IPCC, 2007, 황세운과 강문성, 2013). 농업은 다른 산업과 달리 원천적으로 기후 조건과 변화에 크게 좌우되는

분야로, 기후변화로 인한 영향에 민감한 분야라 할 수 있으며, 농업 수자원은 안정적이고 지속적인 작물 생산을 위해서 기후변화가 미치는 영향을 정확히 파악할 필요가 있다 (유승환, 2009). 하지만 기후변화와 이에 따른 기상 of 극치사상 발현빈도의 증가, 그리고 물 환경의 취약성 및 불확실성이 증가하여 농촌 용수 해석의 불확실성 또한 증가하고 있으나, 이를 해석하기 위한 국내 실정에 맞는 모형 및 분석 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. (그림 1-2)는 기후변화와 그에 따른 홍수재해, 해수면 상승, 가뭄피해 등의 영향을 보여주고 있다.



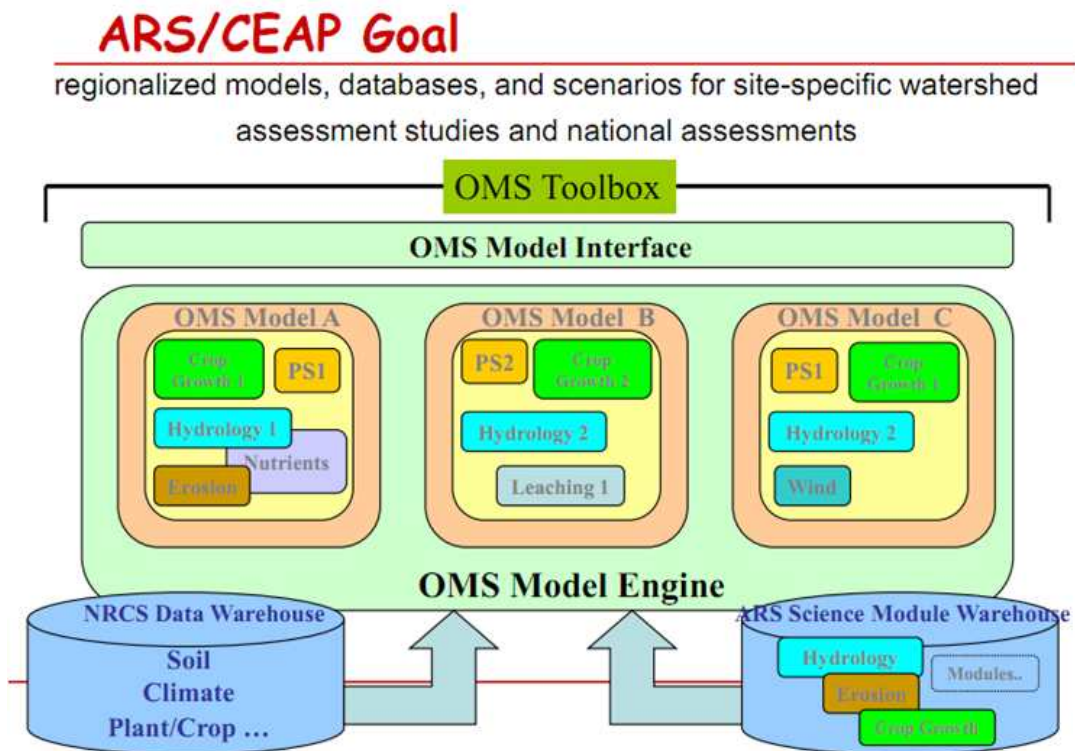
(그림 1-2) 기후변화 및 그 영향

국내에서는 농촌용수 해석을 위하여 국외에서 개발된 다양한 수문, 수리, 수질 모형이 적용되어 왔으나, 대부분의 모형이 지역적 조건인 기상, 토양, 작물, 지형, 기후, 토지 이용 등이 상이한 조건에서 개발된 모형들이었다. 우리나라 조건에 맞게 일부 모형을 수정하여 적용한 사례가 있지만, 논과 농업용 저수지의 물관리 등과 같이 지역적으로 상이한 환경조건과 복잡성 등을 고려하여 능동적으로 모형이 구축되지는 않았다.

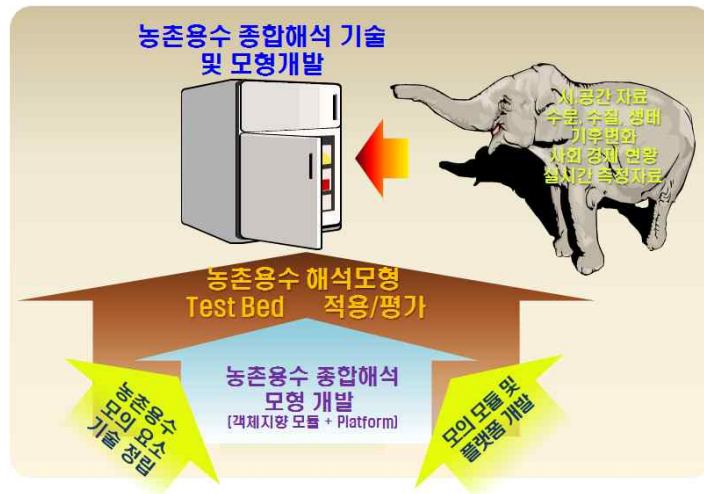
우리나라 실무에서의 농업용 수리구조물 설계는 HOMWRS (Hydrologic Operation Model for Water Resources System) 모형을 주로 사용하고 있으나 저수지 운영에 있어 홍수기 제한수위 운영과 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않고 있으며, 중간낙수 시기의 농업용수 공급량 중단 기작을 고려하지 못 한다. 또한, TANK 모형의 매개변수 추정식은 1988년에 개발된 이후로 개선되지 않았으며, 농촌용수 물순환의 중요 요소인 관개지구 배수량, 하류 하천유량, 지하수 유출량, 그리고 오염부하량 등을 모의하는데 한계가 있다. 이외에 기상청 제원 입력/매개변수 입력에 한계가 나타나며, 오류 발생시 프로그램이 강제 종료되고, 일별 출력 파일에 단위가 기재되지 않는 등 전/후 처리 시스템의 개선이 필요한 것으로 나타나고 있다.

한편, 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수 해석의 복잡성 및 지역 특성을 반영하여 물순환을 모의하는 모형의 개발 필요하다. 또한, 농촌용수의 복잡성 및 광범위성을 효율적으로 해석하기 위해서, 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 객체지향 모델링 기법 기반의 모델링 Framework 및 시스템 개발이 필요하다. (그림 1-3)은 Object Modeling System의 개념도를 보여주고 있다.

최근의 연구는 인터넷의 발달과 컴퓨터 전산기술의 진전으로 유역단위 공간자료 및 기초자료 DB를 활용하고, 실시간 계측자료를 모의에 활용하며, 기후변화를 고려할 수 있는 등 모델링의 정도를 향상시키고, 이러한 모형 예측 결과를 의사결정에 활용하는 보다 통합적인 관점에서 DB, 해석 모형, 의사결정 등의 통합시스템이 요구된다. 이를 통하여 개발된 통합시스템은 사용자 지원시스템을 기반으로 하는 GUI를 제공하며, 환경적인 정보 검색의 용이성, 다양한 분석도구 제공, 다양한 유역모형과 수질모형의 시스템 내에서 실행 등이 가능함으로서, 다양한 정보를 효율적으로 손쉽게 획득할 수 있으며, 정책관리자나 사용자가 의사결정을 하는데 도움을 줄 수 있어야 할 것이다. 또한, 물순환 해석 모형의 매개변수의 불확실성 특징을 구명할 수 있는 효율적인 방법이 고려되어야 하며, 추계학적 모형 및 결정론적 모형과 추계학적 모형의 병용 모형 개발 등의 연구를 통해 모형 사용자의 기대에 부응하는 기능성과 응용성을 확보할 수 있는 통합시스템의 개발이 필요하다. (그림 1-4)는 객체지향기법 기반의 통합적 농촌용수 해석 모형 개발의 개념도를 보여주고 있다.



(그림 1-3) Object Modeling System 개념도



(그림 1-4) 농촌용수 종합해석 모형개발 개념도

제 3 절 연구개발의 필요성

1. 기존 연구의 문제점 및 앞으로의 전망

1.1. 기존 연구의 문제점

국내외에서 개발된 농촌용수 해석 모형과 관련된 기존 연구의 한계 및 문제점은 다음과 같다.

- ① 국내 유역 모형은 대부분 도시를 위주로 개발/적용되어 왔으며, 농촌용수 해석 및 적용에 대한 투자는 미흡한 실정이다. 또한, 국외에서 개발된 다양한 수문/수리/수질 모형이 적용되어 왔으나, 대부분의 모형이 기상, 지형, 토양, 토지 이용 등 환경 조건이 상이한 조건에서 개발된 모형들이며, 국내 조건에 맞게 일부 모형을 수정하여 적용한 사례가 있지만, 논과 농업용 저수지의 물관리 등과 같이 지역적으로 상이한 환경조건과 복잡성 등을 고려하여 능동적으로 모형이 구축되지는 않았다.
- ② 우리나라 실무에서의 수리구조물 설계는 유역단위 물수지 해석, 농업용 저수지 설계 및 수문 조작 등 농촌용수 해석을 위해 가장 널리 활용되고 있는 HOMWRS 모형을 사용하고 있으며, 가지야마 공식 또는 Tank 모형을 이용하여 저수지 유입량을 모의하며, 필요수량을 통해 농업용수 공급량을 모의하고, 저수지 물수지 분석을 통해 저수지 조작 운영이나 수리구조물 설계에 많이 이용되어 왔다.
- ③ HOMWRS 모형은 농촌유역의 저수지 운영을 위하여 단순한 모형을 적용함으로써 사용이 편리한 반면, 유역 및 호소에서의 수질에 대한 고려가 없고 집중형 모형으로 공간적 분포 특성 고려에 미흡한 측면이 있다. 또한, 일별·순별 기반의 이수 측면만을 모의할 수 있으며, 저수지 운영에 있어 홍수기 제한수위 운영과 연 단위 관개효율 변화를 고려하지 않고 있으며, 중간낙수 시기의 농업용수 공급량 중단 기작을 고려하지 못 한다. 또한, TANK 모형의 매개변수 추정식은 1988년에

개발된 이후로 개선되지 않았으며, 농촌용수 물순환의 중요 요소인 관개지구 배수량, 하류 하천유량, 지하수 유출량, 그리고 오염부하량 등을 모의하는데 한계가 있다. 이외에 기상청 제원 입력/매개변수 입력에 한계가 나타나며, 오류 발생시 프로그램이 강제 종료되고, 일별 출력 파일에 단위가 기재되지 않는 등 전/후처리 시스템의 개선이 필요하다.

- ④ 우리나라 물순환 해석을 위해 기 개발된 시스템은 상기 기관에서 관리하는 자료에 대해서는 접근 및 구축을 수월하나, 농촌구역의 복잡성, 지역적인 특성 등을 대표하는 자료들에 대한 전체적인 접근 및 구축하는데 미흡한 점이 있다. 또한, 대부분의 기 개발된 자료 관리 시스템은 농촌구역 물순환 해석을 위해서 필요한 자료 전처리 과정과 모형과 연계되어 자료를 제공하는 기능이 부족하여 실시간 해석을 필요로 하는 농촌구역 물순환 해석에 적용하기에는 한계가 있다. 오히려 각 부처별로 필요에 따라 정보시스템을 개발함에 따라 중복이 많을 정도로 광범위한 정보의 홍수를 이루고 있는 실정이다.
- ⑤ 국내외에서 개발된 많은 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 지형 특성과 물리적 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 또 다른 제약은 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 입문자가 쉽게 이용하기 어렵다는 특징이 있다.
- ⑥ 또한, 기 개발된 국내외 모형은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 해석하는데 한계가 있으며, 컴퓨터 기술 발전에 따른 계산능력이 크게 향상되었음에도 불구하고 농촌용수 해석이 직면하는 문제의 복잡성은 광범위한 요소가 포함되고 있어 가중되고 있으며, 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 따라서 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 능동적 모형 개발이 시급히 요구된다.
- ⑦ 이러한 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 맞춤형 모형을 구축하여 해석하는 환경을 제공하는 컴포넌트 기반 모델링 Framework이 필요하나, 그에 대한 연구나 노력은 미흡한 실정이다.

1.2. 앞으로의 전망

농촌용수 해석 모형 개발 분야의 앞으로의 전망 및 발전 방향은 다음과 같다.

- ① 최근의 연구는 인터넷의 발달과 컴퓨터 전산기술의 진전으로 유역단위 공간자료 및 기초자료 DB를 활용하고, 실시간 계측자료를 모의에 활용하며, 기후변화를 고려할 수 있는 등 모델링의 정도를 향상시키고, 이러한 모형 예측 결과를 의사결정에 활용하는 보다 통합적인 관점에서 DB, 해석 모형, 의사결정 등의 여러 시스템을 통합하는 방향으로 이루어지고 있다.
- ② 유역 수리·수문·수질 통합시스템은 사용자 지원시스템을 기반으로 하는 GUI를 제공하며, 환경적인 정보 검색의 용이성, 다양한 분석도구 제공, 다양한 유역모형과 수질모형의 시스템 내에서 실행 등이 가능함으로서, 다양한 정보를 효율적으로 손쉽게 획득할 수 있으며, 정책관리자나 사용자가 의사결정을 하는데 도움을

주도록 발전하고 있다.

- ③ 물순환 모형의 지속적 개발과 더불어 GIS, 전문가 시스템, GUI, 객체지향 모델링 기법, RS 등의 새로운 기술을 물순환 모형과 통합하기 위한 사용자 중심의 종합적 통합 시스템으로의 개발이 이루어져야 할 것이다.
- ④ 수리·수문·수질 해석 모형의 매개변수의 불확실성 특징을 구명할 수 있는 효율적인 방법이 고려되어야 하며, 추계학적 모형 및 결정론적 모형과 추계학적 모형의 병용 모형 개발 등의 연구를 통해 모형 사용자의 기대에 부응하는 기능성과 응용성을 확대해 나가기 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.
- ⑤ 또한, 최근에는 기후, 수문, 수자원뿐만 아니라 물 순환의 변화로 인해 야기되는 인문·사회·경제적 영향을 예측할 수 있는 인간과 물의 결합 시스템을 위한 다양한 사회수문모형을 개발하고, 이를 실제 의사결정에 활용될 수 있도록 개선하는 사회-수문시스템 모델링 또한 주목받고 있다.
- ⑥ 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여, 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 기술 개발 및 동적 모의 플랫폼 개발이 요구되며, 이는 농촌용수의 용수구역 단위의 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안 등을 통하여 지속가능한 농촌용수 건전성 확보와 국가의 풍요로운 청정 수자원 실현에 기여할 것으로 전망된다.

2. 연구개발의 필요성

농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발의 필요성을 정리하면 다음과 같다.

- ① 삶의 질 향상에 따른 농촌공간의 다양성 증대로 농촌용수 해석에 있어서도 문제의 복잡성이 커지고, 또한 지역적으로 특이한 양상으로 나타나고 있으며, 이러한 다양한 측면을 고려하고 동시에 고유한 문제 해결을 위해서는 문제 특이적 맞춤형 모형 구축이 필요하며, 이를 지원하기 위한 객체지향 기반의 농촌용수 종합해석 모델링 Framework가 시급히 요구된다.
- ② 미래 농촌용수의 양적, 질적 안정성 확보를 위해서는 기후변화에 따른 지역적 특성을 고려한 농촌용수 해석이 필요하다.
- ③ 컴퓨터 기술 진보에 따라 기존의 단편적인 문제 위주의 모형 기술을 극복할 수 있도록 시·공간 자료 및 실시간 자료를 적극적으로 활용한 농촌 지역의 기상, 토양, 산림, 영농, 수문, 수질, 수리시설물 관리 현황 등의 종합해석 기술을 개발하고 실제 정책 수립을 위해 종합적인 의사결정지원시스템 구축이 필요하다.
- ④ 물순환 모델링 선진국에서는 자국의 물순환 건전성 강화를 위한 기상, 토양, 수문, 수질 등을 고려한 모델링 시스템을 개발하여 학문적 원천기술 확보는 물론 그 기술력을 보급·전파하여 학문적 우위를 점하고 있는 실정이다. 따라서 우리나라도 농촌지역 물환경 관련 분야의 학문적·기술적 종속성을 탈피한 기술력을 선점하기 위하여 국내 요소기술 기반의 농촌용수 해석 모형 기술 개발을 통한 원천기술의 수월성 확보 및 전문인력 양성이 필요하다.

- ⑤ 국내 모형인 HOMWRS의 한계점인 저수지 홍수기 제한수위 운영과 연단위 관계 효율 변화를 고려하지 않고, 중간낙수 시기의 농업용수 공급량 중단 기작을 고려하지 못 하는 점과, 또한 TANK 모형의 매개변수 추정식이 개선되지 않았으며, 농촌용수 물순환의 중요 요소인 관개지구 배수량, 하류 하천유량, 지하수 유출량, 그리고 오염부하량 등을 모의하는데 한계가 있는 점, 그리고 전/후처리 시스템의 개선이 필요한 점을 종합적으로 고려하여 농촌용수 물순환 해석 모형의 개발이 필요하다. 또한, 국내외에서 개발된 많은 모형이 지형 특성과 물리적 매개변수를 쉽게 구축할 수 없으며, 입·출력변수가 복잡하여 다양하여 입문자가 쉽게 이용하기 어려운 점을 고려하여 사용자 편의성을 고려한 모형 개발이 필요하다.
- ⑥ 효율적인 농촌유역 수자원 관리를 위해서는 내외부의 복합적인 환경변화를 능동적으로 반영하기 위한 요소 모듈 방식의 지능형 관리기법의 개발이 필요하다.
- ⑦ 이상과 같이 국내외에서 개발된 기존 모형은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성·다양화·복잡화를 해석하는 데 한계가 있으며, 특히 농촌용수 지구에 다양하게 존재하는 수리시설물과 지역적 물관리 방식을 포함한 종합적 농촌용수 물순환 해석에는 적용성이 미비한 것이 현실이다. 따라서 이러한 농촌용수 지구를 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수 기작에 대한 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모형 형태의 컴포넌트 기반 모델링 Framework의 개발이 필요하다.
- ⑧ 농촌용수 물순환 종합해석을 위한 모델링 Framework는 기상, 토양, 작물, 산림, 농학, 수리·수문, 수질, 수리시설, 프로그램 등을 포함하는 광범위한 연구 분야가 포함되어야 함으로 단기적 관점에서 수행될 수 있는 연구 사업으로는 한계가 있다. 따라서, 각 학문 분야별 전문가그룹을 통섭하고, 국가적 차원의 중·장기적인 관점에서 종합적/체계적 계획을 수립하여 추진해야 한다.

제 4 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표 및 주요내용

1.1. 연구개발의 최종목표

본 연구의 최종목표는 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여,

- ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 기술 및 모듈 개발,
- ② 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 Framework 모듈 구성 및 동적 모의 플랫폼 개발,
- ③ 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안

등을 통하여 농촌수자원의 체계적·과학적 해석 및 관리 시스템을 개발하는 데 있다.

1.2. 주요 연구개발 내용

본 연구의 주요 연구개발 내용은 다음과 같다.

- ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 모듈 설계 및 통합 해석 기술 개발
 - 농촌용수 해석 모의 요소별 첨단 해석 기술 개발
 - 요소 해석 기술의 민감도 분석 및 평가 기술 개발
 - 용수구역 단위 모형 매개변수 자동 보정 기법 개발
 - 객체지향 모델링 기법 기반의 플랫폼 설계 기법 개발
 - 농촌용수 종합정보시스템과의 연계 모듈 기법 개발
- ② 객체 지향의 요소별 해석 모듈 개발 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 객체지향 모델링 기반의 농촌용수 요소 모듈화 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축
 - 시·공간 자료의 모형 적용을 위한 전/후처리 모듈 개발
- ③ 농촌용수 종합해석모형의 시험적용·평가 및 실용화 방안
 - 농촌용수 시험지구 선정, 현장조사 및 운영
 - 농촌용수 개발모듈의 시험지구 적용 및 평가
 - 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안

2. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

연차별 연구개발의 목표 및 내용은 다음 <표 1-1>과 같다.

<표 1-1> 연차별 연구개발의 목표 및 내용

구분	연구개발의 목표		연구개발의 내용
1차년도 (2012 ~ 2013)	제1 세부	농촌용수 해석 요소 구성 및 농촌용수 모형 Framework 설계 시·공간 자료 전처리 기술 조사	국내외 모형 적용 요소기술 현황 조사 요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성 모형의 구성요소 결정 및 Framework 설계 농촌용수 분석 객체 모델링 기법 설계 GIS기반 자료로부터 수문/수질 계수 추출방법 조사 및 적정방안 선정 모형 입력자료 구축 및 연계기술 정립
	제1 협동	농촌용수구역 Testbed 선정 및 모니터링 시스템 구축	시험지구 선정, 현장조사 및 설계 농촌용수 모니터링 시험구역 운영 : 시험지구 운영을 위한 모니터링 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 : 사용자 모형 설문조사
	제2 협동	객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발	농촌 용수구역 관련 자료조사 및 분석 객체지향 모델링 기반 요소기술 개발 모듈 기반의 플랫폼 개발

<표 1-1> 연차별 연구개발의 목표 및 내용 (계속)

구분	연구개발의 목표		연구개발의 내용
2차년도 (2013 ~ 2014)	제1 세부	농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발 농촌용수 종합정보 DB와 연계 기술 개발	해석 요소별 모의 기술 정립: 수치모형 or 경험공식 등 논에서의 수문/수질 기작 모의 기술 개발 농촌용수종합정보 시스템 인터페이스 구축 방안 정립 실시간 측정 자료의 표준화 및 연계 모형 검·보정 기술
	제1 협동	시험지구 설치·운영 및 수문/ 자료 수집 수집 자료의 데이터베이스화	시험지구 선정, 현장조사 및 설계 시험지구 현장 수리시설 및 물관리 조사 농촌용수 모니터링 시험유역 운영 시험지구 운영을 위한 모니터링 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 종합해석 모형의 적용성 분석
	제2 협동	동적 모의 플랫폼 개발	농업용수 종합해석 모형 관련 자료 분석 모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석

<표 1-1> 연차별 연구개발의 목표 및 내용 (계속)

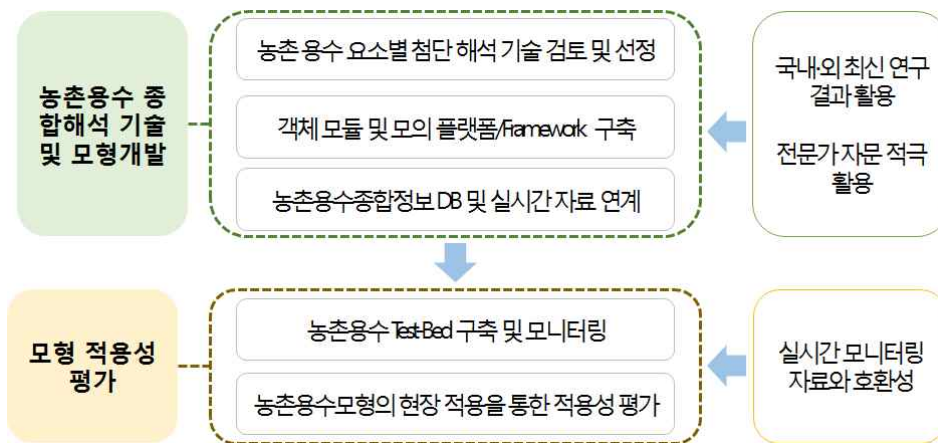
구분	연구개발의 목표		연구개발의 내용
3차년도 (2014 ~ 2015)	제1 세부	객체기반 농촌용수 해석 Platform 구성 및 종합모형 개발 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발	모의 요소별 모듈 상호 호환성 확보 모의 요소간 연계 및 모형 최적화 모의 자료의 분석, 그래프화 등 후처리 기술 개발 모의결과 기반 의사결정 지원 기술 개발
	제1 협동	종합해석 모형의 농촌 용수구역에 대한 적용성 평가 및 실용화방안 제시	시험지구 현장 운영 및 자료 수집, DB 구축 농촌용수 모니터링 시험유역 운영 시험지구 운영을 위한 모니터링 연구개발 성과의 효과 분석 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 사용자지침서 작성 및 실용화사업 제시
	제2 협동	시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축 테스트베드 대상의 모형의 적용 및 보완	한국농어촌공사 농촌용수 관련 시스템 연계를 통한 DB 인터페이스 구축 타기관 관련자료 연계 DB 인터페이스 테스트베드 대상의 필요자료 구축 개발된 모형의 적용 및 수정 보완

제 5 절 추진방법 및 체계

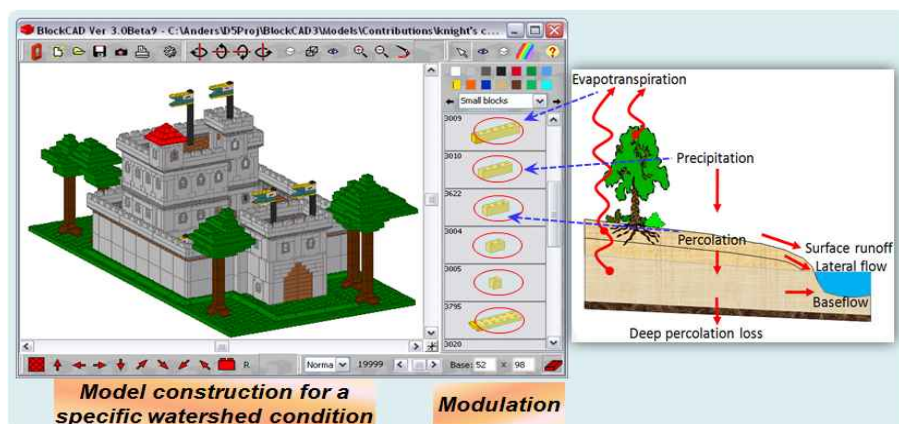
1. 추진방법

본 연구의 최종목표인 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복잡화에 따른 용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석 요소기술 및 모델링 Framework 개발을 위하여 다음과 같은 추진전략을 수립하여 연구를 수행하였다.

- ① 농촌 용수 관련 기상, 토양, 작물, 산림, 영농, 농업수리, 수리/수문, 수질, 소프트웨어 개발 등 관련 학·산·연의 국내 최고 전문가를 연구팀으로 구성하여 연구개발 성과의 극대화가 확보되도록 추진한다.
- ② 농촌유역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복잡화에 따른 첨단 농촌용수 물순환 해석 요소기술을 개발하고 Test-Bed 적용을 통한 현장 적용성을 검증하며, 관련 분야 전문가 자문 및 국제 최신기술을 활용한 연구성과의 신뢰성을 확보하도록 추진한다 (그림 1-5).
- ③ 농촌 물환경의 다양한 요소를 객체지향 기반의 독립적인 모듈로 구성하고, 이를 플랫폼으로 구축하여 모듈 조합을 통한 문제 특이적 농촌 용수 해석이 가능하도록 자료관리시스템 구축 등이 포함되는 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 모델링 Framework를 추진한다 (그림 1-6).



(그림 1-5) 연구 추진 전략



(그림 1-6) 객체 모듈기반 모형 플랫폼 개념도

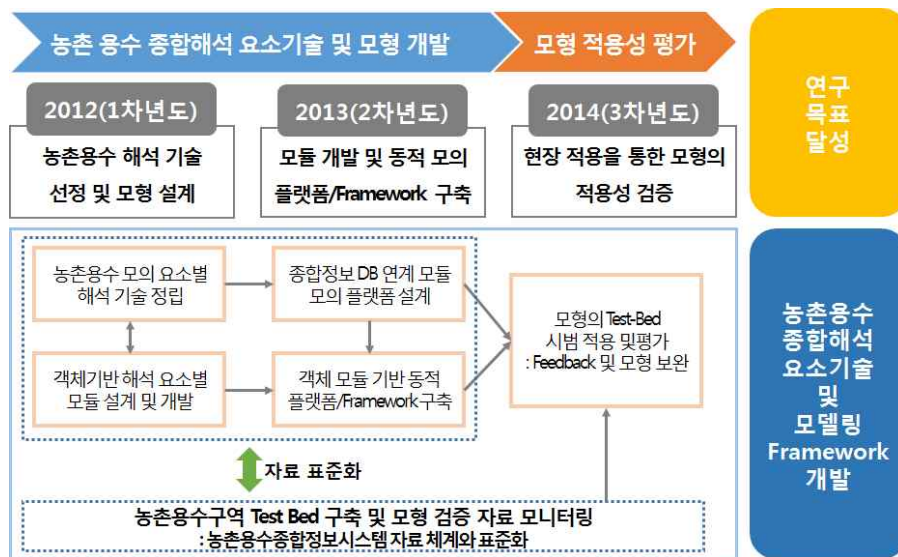
2. 추진체계

본 연구는 서울대학교 (주관기관), 농어촌연구원 (협동기관), ㈜부린 (참여기업) 등 3개 연구기관 및 참여기업의 공동연구로 추진하고 있다 (그림 1-7). 본 연구의 최종목

표는 농촌용수 종합 해석 기술 정립 및 객체기반 모형 개발이며, 총 3개년으로 추진된다. 각 연구기관 및 참여기업별 연구추진 로드맵은 그림 (그림 1-8)과 같다.



(그림 1-7) 연구 추진 체계도



(그림 1-8) 연구 추진 로드맵

제 6 절 최종보고서 체계

본 보고서는 농림축산식품부의 2012년도 자유응모과제 (과제번호: 112041-3)의 과제명 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발” 사업의 일환으로 수행되고 있는 연구의 결과로 구성되어 있다. 본 과제는 총 3개년 (2012년 8월 10일 - 2015년 8월 9일)의 연구사업으로 진행되고 있으며, 당해 연도는 최종년도 (2013년 8월 10일 - 2014년 8월 9일) 연구에 해당된다. 본 최종보고서에는 총 3개년의 연구개발결과 및 성과가 중

합적으로 정리되어 있다.

본 보고서는 제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표, 제 2 장 국내외 기술개발 현황, 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과, 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도, 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획, 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보, 제 7 장 연구시설·장비 현황, 제 8 장 연구실 안전관리 이행실적, 제 9 장 참고문헌, <첨부 I> 특허, 논문 및 시장분석 보고서, <첨부 II> COMFARM 매뉴얼, <첨부 III> 농촌용수 모형 사용자 설문조사, 그리고 <첨부 IV> 연구성과 증빙자료 등으로 구성하고 있다. 각 장별 내용은 다음과 같다.

1. 제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표,

제 1 장은 연구개발의 목적, 필요성 및 범위, 그리고 연구성과 등을 정리하고 있으며, ① 연구 배경 및 필요성, 기존 연구의 문제점과 앞으로의 전망, ② 연구의 최종 및 연차별 목표, 그리고 그에 따른 내용 및 범위, ③ 추진방법, 전략, 체계, 연구진 구성, ④ 보고서의 구성 및 체계, ⑤ 연구성과 목표 대비 실적, 그리고 ⑥ 자문결과 등으로 구성되어 있다.

2. 제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 2 장에서는 우리나라 환경조건에 맞는 농촌용수 물순환 해석 모형 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework를 구축하기 위한 이론적 배경으로 ① 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소 정립, ② 정립된 모의 요소와 관련된 국내외 물순환 해석 모형 및 요소 기술 개발 현황 조사, ③ 컴포넌트 기반 모델링 Framework 연계 기술 조사, 그리고 ④ 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 정리하고 있다.

3. 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 3 장은 본 연구과제의 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술하였으며, 제 1 절 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 제 2 절 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 제 3 절 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용, 제 4 절 통합모델링 최적화 기술의 개발, 제 5 절 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발, 제 6 절 객체지향 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발, 제 7 절 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발, 제 8 절 농촌용수 종합정보/자료 관리 및 표준화 시스템 개발, 제 9 절 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링, 그리고 제 10 절 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 분석 등을 정리하고 있다.

3.1 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용

제 1 절에서는 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용을 위해 ① 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 구성, ② Tank 모형 매개변수 추정 지역화식 개발, ③ 개발된 지역화식을 적용한 Tank 모형 유역 유출량 모의 적용성 평가, ④ Tank 모형과 SWAT 모형의 유역 유출량 비교에 따른 Tank 모형 활용성 평가, 그리고 ⑤ LOADEST 기반 미계측 유역 오염부하량 모의 방법 개발 등을 정리하고 있다.

3.2 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용

제 2 절에서는 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발과 적용성 평가와 관련하여, ① 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성, ② 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용, ③ 홍수기 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 고려한 저수지 물수지 해석 모형의 개발 및 적용, 그리고 ④ ARSIM_rev, BATHTUB, EUTROMOD 모형 기반 농업용 저수지 수질해석 기법의 정립 등의 내용으로 구성되어 있다.

3.3 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용

제 3 절에서는 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용성 평가와 관련하여, ① 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성, ② 전·후처리 컴포넌트 및 기작이 개선된 수정 CREAMS-PADDY 모형 개발 및 적용, ③ 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형 개발 및 적용, ④ 모니터링 및 모델링 기법 기반 관개지구 회귀수량 및 회귀율 분석, 그리고 하천 네트워크 기반 하류 하천유량 추정 모형의 개발 및 적용 등을 정리하였다.

3.4 통합모델링 최적화 기술의 개발

제 4 절에서는 통합모델링 최적화 기술의 개발과 관련하여, ① 매개변수 최적화 모듈의 개발, ② 최적화 모듈의 적용성 평가 등의 내용을 정리하였다. 본 절의 최적화 모듈은 유전자 알고리즘, Simulated Annealing (SA) 등의 최적화 기법을 지원하며 Tank 모형을 대상으로 유전자 알고리즘과 SA를 이용하여 매개변수를 자동 보정하여 최적화 모듈의 적용성을 평가하였다.

3.5 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발

제 5 절에서는 농촌용수의 효율적 관리를 위한 의사결정지원 기술을 개발하기 위하여, ① 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술, ② 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술, 그리고 ③ 논에서의 물관리에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술 등을 정리하고 있다.

3.6 객체지향 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발

제 6 절에서는 객체지향 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발에 관한 내용을 정리하였으며, ① 플랫폼의 개발 언어 및 개발 툴, ② 객체지향 모델링 기반 요소 기술 개발, ③ 모듈기반의 플랫폼 개발, ④ 모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석의 내용을 담고 있다.

3.7 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발

제 7 절에서는 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발과 관련하여 ① 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COMponet-based

Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)의 개발, ② COMFARM 컴포넌트 구성/개발, ③ COMFARM을 이용한 농업유역 모델링 등에 관한 내용을 정리하고 있다. 본 절에서는 COMFARM의 Architecture 및 Interface를 설계·개발하고 컴포넌트로 구성된 농촌용수 물순환 요소 해석 기술의 연관관계를 보여준다. 또한, 농촌용수 물순환 요소 해석 기술의 설계서를 제시한다.

3.8 농촌용수 종합정보/자료 관리 및 표준화 시스템 개발

제 8 절에서의 주요목표는 농촌용수 종합정보/자료 관리 및 표준화 시스템 개발이며, ① 농촌용수종합정보 데이터베이스 구축, ② 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발, ③ 농촌용수종합정보 시·공간 자료 표준화 시스템 개발 등을 정리하고 있다. 본 절에서는 농촌용수 데이터베이스를 구축하기 위해 기상/지형/수문/수질/토양/영농 자료를 수집하고 개체관계도를 설계한다. 이를 바탕으로 농촌용수 종합정보 자료 관리 시스템의 인터페이스를 구축하고 대상 유역을 선정하고 자료 관리 시스템의 적용성을 평가한다. 또한, 농촌용수 종합정보 자료 표준화 시스템 개발을 위하여 기상/수문/지형 인자의 전처리/표준화 기법을 개발하고 시스템의 적용성을 평가한다.

3.9 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링

제 9 절의 주요내용은 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링이며, 국내 및 국외를 대상으로 ① 시험지구 선정 및 수리시설물/물관리 현황 조사, ② 농촌용수 시험지구 운영 및 물순환 모니터링, ③ 시험지구 물순환 모니터링 자료의 품질평가, ④ 영상기반 수위·유량 현장검증 모듈 개발 등이 정리되어 있다.

3.10 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 분석

제 10 절에서는 본 연구에서 개발된 COMFARM을 이용하여 모니터링 Test-Bed를 대상으로 ① 저수지 물수지 모형의 보정 및 검정, ② 농업용수 공급량 모형의 보정 및 검정, 그리고 ③ 모의 결과의 적용성 분석/평가/고찰 등이 정리되어 있다.

4. 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 4 장은 연도별 연구목표에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전의 기여도 등을 기술하고 있으며, ① 연구목표 및 평가착안점, ② 연구개발 목표 및 내용의 달성도, ③ 학술·기술 발전 기여도, 그리고 ④기술·사회·경제적 기대성과 등을 정리하고 있다.

5. 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

제 5 장은 총 3년간의 연구개발 결과에 따른 연구개발 성과를 정량적으로 산출하고, 산출된 결과물을 활용한 구체적인 성과활용 계획을 제시하기 위하여, ① 특허/논문/학술발표/홍보/인력양성/단행본발간/수상 실적 등의 연구개발 성과, ② 실용화/산업화 계획과 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획 등, ③ 향후 지식재산권 확보계획, 그리고 ④ 타 연구에의 활용계획 등이 정리되어 있다.

6. 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 6 장에서는 연구개발과정에서 참가한 국제학술대회를 간략히 정리하고 대표 해외 과학기술관련 문헌들을 통해 수집한 정보를 정리하였으며, ① ASABE/PAWEES/ICID 등에서 수집한 과학기술정보, ② 농촌용수 물순환 관련 해외 보고서 및 단행본 수집정보, 그리고 ③ 국외 최신 학술지논문 과학기술정보 등이 정리되어 있다.

7. 제 7 장 연구시설·장비 현황

제 7 장에는 ① 본 연구의 모니터링에 이용된 연구시설·장비현황, 그리고 ② 본 연구를 통해 구입한 장비 현황 등이 정리되어 있다.

8. 제 8 장 연구실 안전관리 이행실적

제 8 장은 주관연구기관인 서울대학교의 연구실 안전관리 이행실적과 참여연구원 환경안전교육 수료 현황 등을 정리하고 있다.

9. 제 9 장 참고문헌

제 9 장은 본 연구에서 인용된 모든 참고문헌을 정리하였다.

10. <첨부 I> 특허, 논문 및 시장분석 보고서

<첨부 I>은 2015년 현재 최신까지의 특허, 논문 및 시장분석 현황을 정리하였으며, ① 본 연구관련 국내외 기술수준 비교, ② 특허분석, ③ 논문분석, ④ 제품 및 시장 분석 등이 정리되어 있다.

11. <첨부 II> COMFARM 매뉴얼

<첨부 II>은 COMFARM에 대한 간략한 소개, 적용분야, 기능 등을 포함하여 설치방법, COMFARM 모듈 및 입력자료에 대한 설명, 그리고 모듈의 실행 방법 등을 포함한 COMFARM의 실행 방법 등을 포함하고 있다

12. <첨부 III> 농촌용수 모형 사용자 설문조사

<첨부 III>는 대학, 연구기관, 사업기관 등 농촌용수 관련 분야 전문가들을 대상으로 설문 조사를 실시한 내용으로, 농촌용수 해석 관련 가장 많이 사용되는 모형, 본 연구 개발 시스템의 최종이용자, 의사결정 시 가장 유용하게 활용될 사항, 모형의 우선 고려사항을 조사하였으며, 그리고 기존의 모형 중 가장 적절한 모형 등이 조사되었다.

13. <첨부 IV> 연구성과 증빙자료

본 연구개발의 성과인 특허/논문/학술발표/홍보/인력양성/단행본발간/수상 실적의 증빙 자료를 정리하였다.

제 7 절 연구성과 목표 대비 실적

1. 정량적 성과 목표 및 실적

<표 1-2>는 연구기간 (2012년 8월 10일 - 2015년 8월 9일) 중 2015년 8월 현재 기준 지식재산권, 논문, 학술발표, 기술거래, 인력양성, 정책활용, 홍보전시, 그리고 기타 실적의 목표 및 달성도 등을 정리한 것이다. 본 연구기간의 연구계획서 상 정량적 성과 목표는 지식재산권의 출원 및 등록 각 2건, SCI 2편, 비SCI 6편, 기술거래 1건, 정책활용 2건, 홍보전시 2건 등이었다.

본 과업에서는 지식재산권 2건을 출원하였고, 현재 등록을 위한 심사 중이다. 논문은 SCI 3편 게재확정, KCI 7편을 게재하여 정량적 성과 목표를 달성하였다. 기술거래는 특허가 등록 되는대로 실시할 예정이다. 정책제안 2건을 통해 정책활용 실적을 달성하였고, 학술지 기사 2편을 게재하여 홍보전시 실적을 모두 달성하였다. 이외에 연구계획서 상 목표에 설정되지 않았으나, 학술발표 13 편, 인력 양성 6명, 그리고 기타실적 2건을 본 연구 과제를 통해 달성할 수 있었다. 본 연구 과제를 통해 달성한 정량적 성과 목표에 대한 자세한 설명은 [제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획]에 상세히 서술되어 있다.

<표 1-2> 연구개발 정량적 성과 목표 및 달성 현황

구 분	지식재산권		논문		학술 발표	기술 거래	사업 화	기술 인증	인력 양성	정책 활용	홍보 전시	기타
	출원	등록	SCI	비 SCI								
최종목표			2	6		1				2	2	
1차 년도	목표			1								
	실적			1	5			1				1
2차 년도	목표	1	1	1	2							
	실적	1	1건심사중		2	5			3		1	
3차 년도	목표	1	1	1	3							
	실적	1	1건심사중	3 + 1편심사중	4 + 1편심사중	3			2	2	1	1
소 계	목표	2	2	2	6		1			2	2	
	실적	2	2건심사중	3 + 1편심사중	7 + 1편심사중	13	1건 예정		6	2	2	2

2. 연구개발 목표 및 내용의 달성 실적

본 과제의 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용, 그리고 달성도를 정리하면 <표 1-3>과 같다. 또한, <표 1-3>의 비교에는 본 최종보고서상 해당 부분의 기술 위치 (장 및 절)를 나타내고 있다. 세부 연구개발 목표 및 내용을 자체적으로 평가한 결과 모든 내용에 대한 달성도는 100%로 나타났다. 세부 연구개발 목표 및 내용, 그리고 그 달성도에 대한 자세한 내용은 [제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도]에 상세히 서술되어 있다.

<표 1-3> 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용의 달성도

구분	연구개발의 목표	연구개발의 내용	달성도	비고
제1 세부	○ 농촌용수 해석 요소 구성 및 농촌용수 모형 Framework 설계 ○ 시·공간 자료 전처리 기술 조사 ○ 농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발 ○ 농촌용수 종합정보 DB와 연계 기술 개발 ○ 객체기반 농촌용수 해석 Platform 구성 및 종합모형 개발 ○ 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발	국내외 모형 적용 요소기술 현황 조사	100%	2장, 6장
		요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성	100%	3장 1,2,3절
		모형의 구성요소 결정 및 Framework 설계	100%	3장 7절
		농촌용수 분석 객체 모델링 기법 설계	100%	3장 6,7절
		GIS기반 자료로부터 수문/수질 계수 추출방법 조사 및 적정방안 선정	100%	3장 8절
		모형 입력자료 구축 및 연계기술 정립	100%	3장 8절
		해석 요소별 모의 기술 정립: 수치모형 or 경험공식 등	100%	3장 1,2,3절
		논에서의 수문/수질 기작 모의 기술 개발	100%	3장 3절
		농촌용수종합정보 시스템 인터페이스 구축 방안 정립	100%	3장 8절
		실시간 측정 자료의 표준화 및 연계 모형 검·보정 기술	100%	3장 4,8절
		모의 요소별 모듈 상호 호환성 확보	100%	3장 6절
		모의 요소간 연계 및 모형 최적화	100%	3장 4,6절
		모의 자료의 분석, 그래프화 등 후처리 기술 개발	100%	3장 5절
		모의결과 기반 의사결정 지원 기술 개발	100%	3장 1,2,3,5절
제1 협동	○ 농촌용수구역 Testbed 선정 및 모니터링 시스템 구축 ○ 시험지구 설치·운영 및 수문/수질 자료 수집 ○ 수집 자료의 데이터베이스화	시험지구 선정, 현장조사 및 설계	100%	3장 9절
		시험지구 현장 운영 및 자료 수집, DB 구축	100%	3장 9절
		농촌용수 모니터링 시험구역 운영 : 시험지구 운영을 위한 모니터링	100%	3장 9절
		농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 : 사용자 모형 설문조사	100%	<첨부 III>
		시험지구 현장 수리시설 및 물관리 조사	100%	3장 2,8,9,10절
		종합해석 모형의 적용성 분석	100%	3장 10절
		연구개발 성과의 효과 분석	100%	제 4, 5 장
		사용자지침서 작성 실용화시범사업 제시	100%	<첨부II>
제2 협동	○ 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발 ○ 동적 모의 플랫폼 개발 ○ 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축 ○ Testbed 대상의 모형의 적용 및 보완	농촌 용수구역 관련 자료조사 및 분석	100%	3장 8절
		객체지향 모델링 기반 요소기술 개발	100%	3장 1,2,3,6절
		모듈 기반의 플랫폼 개발	100%	3장 6절
		모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석	100%	3장 6절
		한국농어촌공사 농촌용수 관련 시스템 연계를 통한 DB 인터페이스 구축	100%	3장 8절
		타기관 관련자료 연계 DB 인터페이스	100%	3장 8절
		Testbed 대상의 필요자료 구축	100%	3장 8,10 절
		개발된 모형의 적용 및 수정 보완	100%	3장 6절

제 8 절 자문결과

본 연구기간 동안 자문 및 연구회의는 매해 착수회의, 중간발표회의, 연차발표회의, 연구기관별 자체연구회의 등을 수행하였으며, 본 연구와 관련하여 산학연 전문가들을 대상으로 서면 자문 및 현장 평가 자문회의를 개최하였다.

서면 자문 및 현장 평가 자문회의에서 제기된 전문가 집단의 자문 내용은 주로 ① 수질 컴포넌트와의 연계는 제약이 많아 연구 범위에 대한 조정 및 장기적 투자 필요, ② 최종 사용자의 편의성을 최대한 고려한 모형 개발 필요, ③ 충분한 DB의 구축이 기반되는 모형 개발 필요, ④ 저수지 상류 및 하류유역 유출량 해석을 위해서 집중형 이용 고려, ⑤ SWAT 및 HSPF 모형에서 모의가 어려운 관개지구 물순환 해석 고려 등이었다. 기타로는 양수장/관정/보에 대한 고려가 필요, 자료수집시 입력자료에 대한 품질관리 필요, 인위적 요소 및 불활실 요소에 대한 계량 필요, 유역 및 저수지 수질 모의시 복잡한 모형이 아닌 간단한 모의기작 고려, 짧은 연구기간에 따른 사용자 요구를 충분히 만족시키는 시스템 구축 및 GUI 구성에 대한 제한 우려 등이었다. 각각의 자문위원들의 자문 결과를 정리하면 <표 1-4>에서와 같으며, 본 연구는 자문 결과를 종합적으로 반영·조치하였다.

<표 1-4> 자문의견

	자문의견
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저수지 상류에서의 유입량은 집중형을 사용해도 무방할 것으로 사료됨 ○ 양수장, 관정, 보를 고려할 필요가 있으며, 수원공별 장소와 이용량을 아는 경우 사용자가 입력할 수 있도록 고려하면 좋을 것임. ○ 양수장의 경우 과거 관리일지를 참고하고 관정과 보의 경우 관리일지가 있다면 이용하고, 만약 없다면 관행적인 이용량을 입력하거나 기상자료를 이용하여 개략적으로 모의할 수 있을 것으로 생각됨. ○ 저수지 하류의 경우 Tank 모형을 이용할 경우 기존의 실측자료를 이용한 검증 필요함.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저수지 유입량 또는 하천 유출량은 일별 유출해석이며, 객체기반 통합시스템임을 고려할 때, 집중형 모형이 적당할 것임. ○ 관개지구의 물순환 해석에서는 구성요소 (농경지, 용배수로, 저수지 등)의 입출력을 고려한 수지분석과 Network해석이 필요함. ○ 저수지의 용수 공급 후 배수되는 것을 고려하여 회귀수량을 고려해야하며 복잡한 계산식보다는 공급수량의 일정량 (입력변수로 처리)을 회귀수량으로 간주하여 계산하는 것이 타당함
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 입력자료 구축의 용이성을 고려해야 하며, 힘든 경우 EPIC과 같이 충분한 DB의 구축이 바탕이 되는 모형의 개발이 이루어져야 함. ○ 하류 관개지구 수문모의 기술(양수장, 보 등의 관개 시스템 및 회귀용수량)은 복잡형을 고려하여 %를 입력하거나 DB를 구축하는 것이 하나의 방법으로 보임 ○ 유역모형에서의 수질 컴포넌트와의 연계는 제약이 많을 것으로 판단되어 연구 범위에 대한 조정이 필요하며, 장기적 투자가 필요함

<표 1-4> 자문의견 (계속)

	자문의견
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ SWAT/HSPF 등에서 모의가 어려운 복잡 관개 Network를 모의할 수 있는 방향을 추천함 ○ 타 모형에서 입력자료 생성에 많은 시간이 소요되는 점을 고려하여 본 모형에서는 최종 사용자의 편의를 최대한 고려할 필요가 있음. ○ 평야부의 경우 계수문(수리구조물)에 의한 독특한 운영시스템을 가지므로 운영일지 등을 참고하여 이러한 기작을 반영할 필요가 있음. ○ 계수문 포함된 소유역의 경우 관측 data가 전무하기 때문에 여건이 되면 과업기간 중 모니터링 필요함. ○ 황유입량(유역 외) 혹은 회귀수량 등 많은 부분이 불투명하게 관리/운영되고 있어 농어촌연구원에서 이러한 데이터의 구축이 반드시 필요함.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수문모형 단위모듈을 연결하는 과정에서 모듈의 입/출력을 담당하는 wrapper 구성에 있어서 다양한 Library 구축 및 GUI에서 쉽게 선택/적용할 수 있는 wrapper Editor 모듈 구성이 필요해 보임. ○ 데이터의 취합/수정/Filtering/converting을 담당하는 가상의 Data Emulator 모듈을 추가하는 것이 모델 구성에 있어서 유리해 보임.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 의사결정을 지원하는 것이 최종적인 목적이라면 다양한 시나리오를 입력해서 결과를 비교해볼 수 있는 기능이 필요함. ○ 모의기간 중 저수지 재원, Parameter의 변화 등이 반영될 수 있을 필요가 있음. ○ 자료수집 시에 입력자료에 대해 정확한 품질관리가 필요할 것임. ○ 모형자료 입력 이전에 자료의 특이성 등을 사용자가 check해서 자료 이상 유무를 check할 수 있도록 해주면 좋을 것 같음.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유역 증발산량 산정을 위해서는 P-M으로부터 잠재증발산량을 산정 후 토양수분상태를 고려한 실제증발산량 추정 필요 ○ 인위적인 요소(공급량, 배수량) 및 불확실한 요소(수로 손실, 관리 손실)에 대한 정확한 계량 필요 ○ 요소기술 모델링 기법의 검증은 위해서는 요소별 충분한 관측값 필요 <p>짧은 연구기간으로 인해 사용자 요구를 충분히 만족시키는 시스템 구축 및 GUI 구성에 제한이 있을 것으로 우려됨</p>
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 각각의 요소 모형별 신뢰성 범위를 선정하여 특정 요소의 모델 결과가 전체 모델 결과에 미치는 오차/신뢰범위 제시 ○ 전체적으로 동일한 입력자료(항목, 자료수준 등)를 사용하는 것을 추천.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최적화 기법 적용시 유역의 물리적인 특성을 전혀 고려하여 목적함수를 정확하게 정의하고, 결정변수의 범위를 사전에 미리 인지하고 있어야 함.
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수질모델링은 기존의 선진국에서 개발된 모형의 도입과 이들 모형의 국내유역에 대한 적용에만 국한될 것이 아니라, 우리나라의 지형, 기후, 수리 수문 및 수질특성에 적합한 모형의 개발이 필요함,
○○○	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저수지 수질 모의시 복잡한 모형을 사용하는 것이 아니라 간단한 형태의 BATHTUB 및 EUTRO 모형의 적용을 추천함.

제 9 절 요약

본 장에서는 “농촌용수 물순환 종합해석모형 기술 개발” (과제번호: 112041-3)의 연구개발과제의 개요 및 성과목표를 정리하였다. 본 장은 전반적인 연구배경과 그 필요성, 기존 연구의 한계 및 문제점과 향후 전망, 연구개발 최종 목표 및 주요 내용을 살펴보고, 연차별 연구개발 목표 및 내용, 연구사업 추진방법 및 체계, 최종 보고서 체계 및 구성, 연구성과 목표 대비 실적, 그리고 자문결과 등으로 구성되어 있다. 본 장에서의 정리된 내용은 다음과 같다.

- ① 본 연구의 최종목표는 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 및 모델링 Framework를 개발하고, 그 적용성을 평가하여 실용화 방안을 제시하는 것이다.
- ② 연구배경 및 필요성은 물순환 모형의 발전과정, 농촌용수 물순환 해석 요소기술 및 객체 지향 모델링 기법 기반의 Framework 개발의 필요성, 기존 관련연구의 한계 및 문제점, 앞으로의 전망 측면에서 정리하였다.
- ③ 연구개발의 주요내용 및 범위는 종합적 농촌용수 요소별 해석 모듈 설계 및 통합 해석 기술 개발, 객체 지향의 요소별 해석 모듈 개발 및 동적 모의 플랫폼 개발, 농촌용수 종합해석모형의 시험적용/평가 및 실용화 방안 등으로 구성하였다.
- ④ 본 연구는 서울대학교, 농어촌공사 농어촌연구원, (주)부린 등의 주관연구기관과 협동연구기관 등이 공동으로 추진하고 있으며, 연구목표 달성을 위한 다양한 전문가 집단의 자문 및 연구내용 등을 포함하는 연구 추진방법 및 체계를 구성함으로써, 최종 연구 성과를 도출할 수 있도록 구성하였다.
- ⑤ 본 최종보고서는 전체 연구기간의 개발내용을 종합적으로 아울러 정리하였으며, 제 1 장 연구개발과제의 개요 및 성과목표, 제 2 장 국내외 기술개발 현황, 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과, 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도, 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획, 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보, 제 7 장 연구시설·장비 현황, 제 8 장 연구실 안전관리 이행실적, 제 9 장 참고문헌, <첨부 I> 특허, 논문 및 시장분석 보고서, <첨부 II> COMFARM 매뉴얼, <첨부 III> 농촌용수 모형 사용자 설문조사, 그리고 <첨부 IV> 연구성과 증빙 등으로 구성하였다.
- ⑦ 본 연구기간 동안의 정량적 성과를 정리하면, 특허 출원 2건, SCI 3편 게재 확정, KCI 7편 게재, 정책제안 2건, 학술지 기사 2편, 학술발표 13 편, 인력 양성 6명, 그리고 기타실적 2건 등을 본 연구 과제를 통해 달성할 수 있었다.
- ⑧ 본 연구기간 동안 자문 및 연구회의는 매해 착수회의, 중간발표회의, 연차발표회의, 연구기관별 자체연구회의 등을 수행하였으며, 본 연구와 관련하여 산학연 전문가들을 대상으로 서면 자문 및 현장 평가 자문회의를 개최하였으며, 제기된 내용을 정리하였고, 연구수행에 반영/조치하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 서 론

국내외에서는 물순환을 해석하기 위해 다양한 모형이 개발되었으며, 또한 계속적으로 연구가 진행되고 있다. 물순환 과정은 매우 복잡하고, 시·공간적 변동이 심하며, 비선형성을 포함하고 있다 (Hsu et al., 1995; 강문성과 박승우, 2003). 수문 순환 및 오염물질 운송기작을 고려한 모형은 대부분 결정론적 모형으로서, 공간적인 변이에 따라 분포형 모형 (distributed model)과 총괄형 모형 (lumped model)으로 구분된다. 수문사상을 기준으로 단일 홍수사상 모형 (storm event model)과 연속 모형 (continuous model)으로 나누기도 한다. 적용 대상지역을 기준으로 구분하면 도시모형 (urban model)과 농업모형 (agricultural model)으로 나누기도 한다. 또한, 모형의 적용 지역에 대한 공간적 범위에 따라 지점모형 (point model), 포장모형 (field-scaled model)과 유역 모형 (watershed model)으로 나눌 수 있다 (강문성 등, 2012).

이러한 수많은 모형들의 지속적인 개발과 응용은 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 성능 및 기술의 향상으로 수문·수질 모델링과 관련된 연구가 가속화하고 있다. 최근에는 지리정보시스템, 전문가 시스템 (expert system), 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 기법 (object-oriented modeling system, OOM), 원격탐사 (remote sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수문·수질 모형과 통합하기 위한 시스템 개발과 적용성 평가 등의 연구가 활발히 시도되고 있다. 최근에 국내외에서 주로 이용되는 SWAT, HSPF 등의 모형은 사용자 인터페이스를 갖추고 있으며 유출량뿐만 아니라 토양유실량, 영양물질, 농약성분, 대장균 등과 같은 항목을 모의할 수 있도록 물리적 매개변수 기반으로 개발되고 있다.

그러나 유역의 수문 순환은 대상 지역의 특성, 범위에 따라 다르며, 이에 따라 모의 요소와 해석 기법도 다르다. 우리나라 농업 유역은 논, 용·배수로, 그리고 농업용 저수지가 존재하며, 이는 국외에서 개발된 모형의 적용 토지이용과 유역특성이 다르다. 미국 및 유럽에서 개발된 농업 유역 모형은 밭을 중심으로 개발되었기 때문에 논 담수 기작과 농업용 저수지의 운영기작이 반영되어 있지 않아 지역에 따라 한계가 있는 모형이 대부분이다 (송정현 등, 2015b; Song et al., 2015b).

국내에서도 최근까지 수리·수문 해석과 관련하여 연구가 이루어져 왔으나, 대부분 도시를 위주로 개발/적용되어 왔으며, 농촌용수 물순환 해석에 대한 개발 및 적용 등과 관련된 투자는 미흡한 실정이다. 또한, 농촌용수 해석을 위하여 국외에서 개발된 다양한 수문, 수리, 수질 모형이 적용되어 왔으나, 지역적 특성인 기상·토양·작물·지형·토지이용 등을 고려하여 개발한 모델링 프레임워크가 아니기 때문에 적용에 한계가 있다 (강문성 등, 2015).

한편, 물순환 해석모형의 정확도를 증가시키기 위해서는 여러 가지 물리적인 기작이나 고차원적 요소를 고려하는 것이 필요하지만 이는 모형의 복잡성을 증가시키고 모형의 안정성을 저하시킬 수 있다 (강문성, 2012). 물리적 기반 모형은 입력 자료로 직접 측정이 가능한 매개변수와 모형의 보정을 통해서 추정되어야 하는 매개변수들을

포함하고 있기 때문에 적절한 매개변수를 추정해야하는 구조적인 문제점을 가지고 있다 (강민구 등, 2013). 집중형 모형은 일반적으로 분포형에 비해 모형의 구조가 간단하고, 유출 해석에 필요한 입력자료 및 매개변수의 수가 적기 때문에 물리적 특성에 대한 자료 수집이 어려운 경우 실용적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 매개변수 갯수가 많은 모형이 더 좋은 결과를 모의하지 않는다는 사실이 증명된 바 있다 (Beven, 1989; 김계웅 등, 2014). 하지만 토지이용·식생 및 토양 특성의 변화 등과 같은 유역내 수문환경의 변화에 따른 유출 변화 해석에 어려움이 있다는 단점이 있다 (김철검과 김남원, 2012).

따라서 대상지역, 환경조건, 적용 목적 등에 따라 적절한 적용기법을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서 개발할 농촌용수 물순환 해석 모형의 공간적 범위는 저수지 상류유역, 농업용 저수지, 저수지 하류유역으로 구분되는 농촌유역이다. 농촌용수 모의요소의 해석기법은 사용이 편리하면서도, 우리나라 현실에 맞는 방법으로 선정할 필요가 있다.

한편, 농촌 유역의 물순환 해석을 위해서는 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회경제적인 요소 등의 다양한 측면을 포괄하여야 할 것이다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 것을 객체지향 모델링 기법이라 할 수 있다. 즉, 다양한 모의 요소를 하나의 독립적인 객체로 모듈화 하여 다수의 모듈을 조합하여 활용할 수 있도록 하는 개념이다. 이를 통해 특정 문제에 맞게 필요한 모듈을 선정하고 배열하여 맞춤형 모델을 구축하여야 할 것이다.

이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 농촌용수의 용수구역 단위의 종합적인 해석모형의 개발이 필요하다. 농촌용수의 복잡성을 고려하면 모델링 Framework는 다양한 모델 또는 모듈을 통합할 수 있고, 기존의 모델을 수정 하지 않고 모델간 연동이 이루어져야 하며, 따라서 확장성이 뛰어난 객체지향 기반의 Framework를 구성하여야 할 것이다. 국외에서 최근에 개발된 객체기반 통합 Framework는 Modular Modeling System (MMS) (Leavesley et al., 1996), Dynamic Integration Architecture System (DIAS) (Sydelko et. al., 1999), Interactive Component Modeling System (ICMS) (Rizzoli et al., 1998), Spatial Modeling Environment (SME) (Costanza and Voinov, 2003), Invisible Modeling Environment (TIME) (Rahman et al., 2003), Framework for Risk Analysis in Multimedia Environmental Systems (FRAMES) (Whelan et al., 1997), Objective Modeling System (OMS) (David et al., 2002), 그리고 European Open Modeling Interface and Environment (OpenMI) (Gijsber et al., 2002) 등이 있으며, 이들은 지속적인 개발 및 적용이 이루어지고 있다.

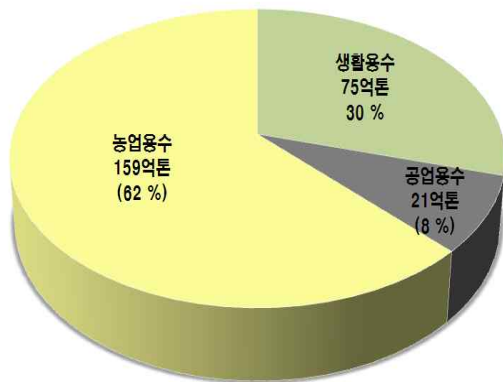
본 장에서는 우리나라 환경조건에 맞는 농촌용수 물순환 해석 모형 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework를 구축하기 위한 이론적 배경으로 ① 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소를 정립하고, ② 정립된 모의 요소와 관련된 국내외 물순환 해석 모형 및 요소 기술 개발 현황을 조사하고, ③ 컴포넌트 기반 모델링 Framework 연계 기술을 조사하여 본 연구의 이론적 배경을 제시하고, ④ 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치를 분석하고자 한다.

제 2 절 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소

우리나라 농업유역은 논, 밭 등의 농작물의 재배활동이 이루어지는 생산 공간과 산림 및 주거지 등으로 구성되어 있으며, 작물의 생육에 필요한 물을 인위적으로 공급하기 위한 농업용 저수지 등의 수리시설물이 위치하고 있다 (임상준, 2000; 송정현, 2013).

우리나라는 (그림 2-1)과 같이 2007년 기준 총 이용량 (333억톤) 중 하천유지용수를 제외한 수자원 이용량의 약 62%인 159억톤을 농업용수로 이용하고 있으며, 이 중 약 80%가 4월에서 9월까지 논 용수량으로 이용되고 있다 (국토해양부, 2011). 논 용수량은 2011년 기준 전체 논벼 면적 중 약 80%가 수리시설물을 통해 공급받고 있으며 (농림축산식품부, 2014a), 수리답 중 56.2 %가 저수지를 통해 공급받고 있다 (그림 2-2), (농림축산식품부, 2014b).

농업용 저수지는 저수지 상류 유역의 유출량에 의해 저수량이 늘어나며 이를 통해 농업용수를 공급한다. 농업용 저수지는 농업용수 공급에 의한 회귀되는 수량에 의해 비강우시에도 하류하천의 수량을 풍부하게 하며 농업용수를 공급하지 않고 저장하는 시기에는 유출량을 상대적으로 낮추는 역할은 한다 (송정현 등, 2015a; 송정현 등, 2015b). 때로는 홍수기 제한수위를 설정하여 방류하는 양에 따라 하류 하천에 영향을 미친다. 즉, 농업용 저수지의 운영기작에 따라 농업유역은 저수지 하류유역의 수문 순환과 저수지 상류유역의 수문 순환이 연계되어 복합적으로 발생한다. 따라서 농업유역의 물순환을 모델링하기 위해서는 저수지 상류유역, 수리시설물 (농업용 저수지), 저수지 하류 관개지구를 구분해야 한다.



(그림 2-1) 우리나라 수자원 이용량
(국토해양부, 2011)



(그림 2-2) 수리시설물별 수리답 면적 구성비
(농림축산식품부, 2014b)

저수지 상류유역은 산림지가 대부분을 차지하며, 논과 밭, 그리고 주거지가 일부 차지한다. 저수지 상류의 유출량은 저수지로 공급되어 관개기 농업용수로 이용된다 (그림 2-3). 산림지의 물수지 해석이나 유출량의 추정에 있어서 중요한 요소 중의 하나가 증발산량이며, 산림지의 연증발산량은 강우량의 40~70% 정도에 이르는 것으로 보고되고 있다 (임상준, 2000). 따라서, 농업용 저수지로 유입되는 유입량 추정에 있어 유역 증발산량은 중요한 인자이다. 또한, 저수지 상류유역에 내린 강우 중 일부는 지하

로 심층 침투되며 이는 하류의 지하수 유출에 영향을 미친다.



(그림 2-3) 하천 유출량 및 저수지 유입량 전경

농업용 저수지는 관개지구 논벼의 담수재배를 위해 농업용수를 공급하는데, 이를 농업용수 공급량이라 한다 (그림 2-4). 일반적으로 4월 중순부터 농업용수를 공급하기 시작하여 9월말에 종료하게 되며, 공급량은 생육단계에 따라서 시기별 변화가 크다 (정하우 등, 2006). 논벼의 중간낙수시기에는 농업용수를 공급이 중단된다. 남원호 등 (2011)은 수리시설물 운영자의 약 86%가 중간낙수기를 고려하여 저수지를 운영하고 있다고 보고하고 있다. 농업용 저수지의 수위가 만수위를 초과하면 자연 월류식 물넘이를 통해 초과된 수량이 하천으로 방류되는데 이를 만수위 방류량이라 한다.

최근에는 일부 농업용 저수지에서 농업용수 공급 목적뿐만 아니라 수문 등을 새로 설치하여 제한수위 운영을 통한 홍수 조절 목적이 추가되고 있다. 제한수위 운영은 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 규정되어 있으며 수위조절장치 (수문)가 있는 저수지에 대하여 용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 제한수위를 초과하는 수량에 대해 방류해야 한다. 이와 같이 제한수위 운영에 따른 방류량을 제한수위 방류량이라고 하며 저수지 하류 하천의 유출량에 영향을 미치는 요소이다.

한편, 농업용 저수지는 농업용수 공급에 목적을 두고 건설되어 환경용수 공급은 고려 대상이 아니었다. 하지만 최근 실시된 농업용 저수지 독 높이기 사업의 목적에 환경용수 공급이 포함되었으며, 향후 농업용 저수지에서는 운영 목적으로 환경용수를 공급할 수도 있다. 환경용수는 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 최소한의 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 하천유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 의미한다 (김상민 등, 2011). (그림 2-5)는 농업용 저수지의 물넘이 전경을 나타내고 있다.



(그림 2-4) 농업용 저수지의 관개용수 공급 전경



(그림 2-5) 농업용 저수지의 물넘이 전경

농업용 저수지의 하류유역은 저수지를 농업용수를 공급받는 관개지구와 산림지, 밭 등 관개를 실시하지 않는 배후 유역이 산재하고 있으며, 저수지를 통해 월류되는 수량과 환경용수 등으로 공급되는 수량이 하천으로 유입된다. 배후 유역은 일반적으로 U자 혹은 V자 형태로 관개지구를 인접하게 에워싸고 있거나 관개지구 주위를 완전히 포위하는 O자 형태를 이루고 있다 (임상준, 2000). 이러한 저수지 하류유역은 배후 유역에서 발생하는 유역 유출량, 인위적인 농업용수 공급으로 인한 관개지구의 배수량, 저수지에서 방류되는 수량이 하천으로 유입되는 유출 순환 과정을 이루게 된다. 그러므로 저수지 하류 유역의 유출량은 저수지에서 방류되는 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량과 배후 유역에서 유입되는 횡 유입량과 관개지구의 배수량, 그리고 지하수 유출량에 따라 결정된다. 특히, 관개지구의 배수량은 유역의 물 수급 전망, 하천 유황의 예측, 농업비점오염 부하량 추정 등 유역 수자원 관리에 있어서 중요한 요소이다. 관개지구의 배수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬높이 등의 인위적 요소에 영향을 받고 시설재배지의 면적 등에 의해 영향을 받는다.

관개지구는 논벼의 담수재배를 위해 수리시설물로부터 관개용수를 공급받는 지역으로 수리시설물, 논, 용수로로 구성된다. 수리시설물로부터 공급된 농업용수는 논 포장으로 유입되며, 용수를 송수하는 과정에서 증발 및 침투에 의해 손실이 발생한다. 일부는 포장으로 공급되지 않고 용수로에서 하천으로 배수되며, 이를 배분관리용수량 또는 용수로 배수량이라 한다. 논 포장으로 공급된 용수량과 강우량은 담수심을 높이며, 담수된 수량 중 물꼬높이 이상의 수량은 물꼬를 넘어 배수로 배수되며, 이를 논 포장 배수량이라 한다 (그림 2-6) (송정현 등, 2013a).

한편, 고부가가치 농산물 생산에 대한 정책적 지원이 전국적으로 확대됨에 따라 시설재배지는 1986년부터 2005년까지 지속적으로 증가하는 추세이다. 시설재배지의 총면적은 2005년 기준 100,915 ha인 것으로 조사되었으며 (농림부, 2006), 2006년 이후 다소 감소하였지만 2011년 기준 93,416 ha로 넓은 지역을 차지하고 있다 (농림수산식품부, 2012). 시설재배지는 관개지구와 같은 저평야 지역에서는 용수원과 수리시설이 완비된 논 일부가 시설재배지로 전용되고 있다 (이남호 등, 1998). 시설재배지는 불투수면으로 작용하여 강우가 지하로 스며들지 못하고 배수로를 통해 일시에 하천으로 유입됨에 따라 하천수위 급상승에 기여한다 (김학관, 2009).

따라서 농업용 저수지의 하류 유출량은 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 공급량, 용수로 배수량, 논 포장 배수량, 비관개지구 (배후유역) 유출량, 지하 유출량

등이 복합적으로 영향을 미친다.

농업유역의 물순환을 모델링하기 위해서는 저수지 상류유역, 수리시설물 (농업용 저수지), 저수지 하류 관개지구를 구분해야 한다. 이상을 정리하여 각각의 모의 요소를 나타내면 <표 2-1>과 같으며, 농업유역의 물순환을 나타내면 (그림 2-7)과 같다.



(a) 담수



(b) 포장배수량



(c) 배수로

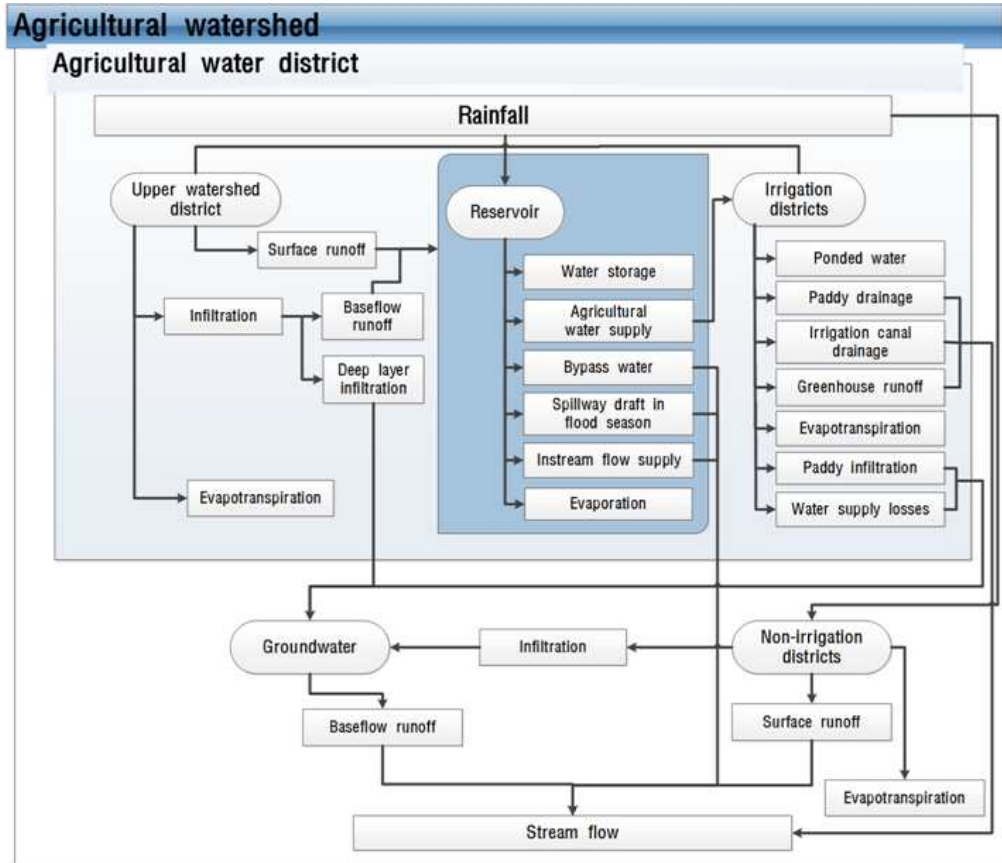


(d) 용수로

(그림 2-6) 논외 담수, 포장 배수량 및 용수로 배수량 전경

<표 2-1> 농업유역의 모의요소

구분	모의 요소	구분	모의 요소
저수지 상류유역	유출량	저수지 하류유역	논 침투량
	유역 증발산량		유효수량
	지하 침투량		필요수량
	상류 수질		송수 손실량
농업용 저수지	만수위 방류량		용수로 배수량
	제한수위 방류량		논 포장 배수량
	환경용수 공급량		논 증발산량
	농업용수 공급량		논 수질
	저수지 수위		관개회귀수량
	저수량		농업용수 회귀율
	저수지 수질		시설재배지 유출량
	수면 증발량		비 관개지구 유출량
수면 강우량	지하수 유출량		
	하류 유출량		
	하류 수질		



(그림 2-7) 농업유역의 물순환 및 모의요소 모식도

제 3 절 국내외 물순환 해석 모형의 개발현황

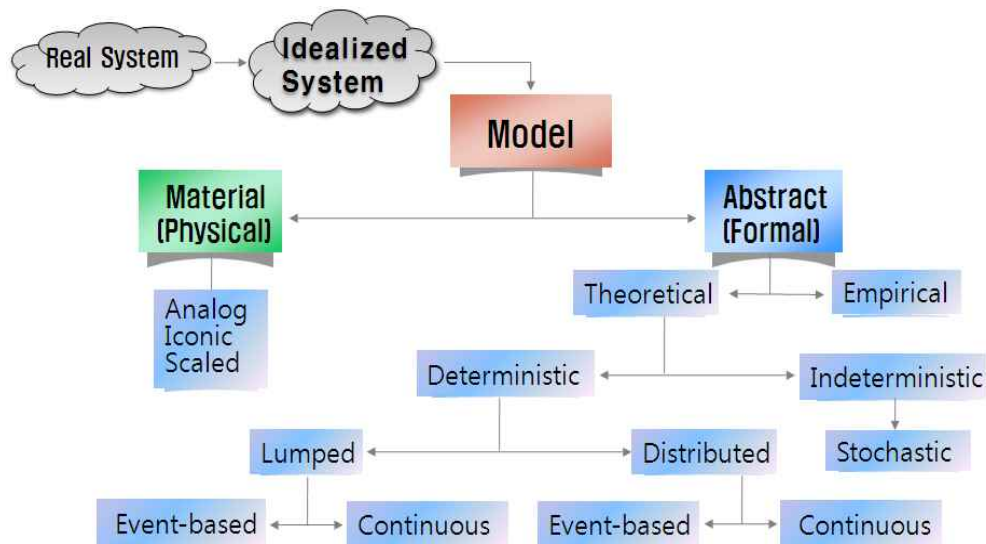
1. 물순환 모형의 구분 및 개발현황

1.1. 수문·수질모형의 구분 및 종류

수문모형은 수문학자들에 의해 여러 범주로 분류되어 왔으며, Chow (1974)는 (그림 2-8)에서와 같이, 모델링 기법을 물리적, 결정론적 및 추계학적 모형 등을 포함하는 여러 가지 범주로 구분하였다 (Novotny and Olem, 1993; Tim, 1996; 강문성, 2009). 수문모형은 물순환 과정의 물리적 관계의 분석 유무에 따라 결정론적 모형(deterministic model)과 비결정론적 모형 (indeterministic model)로 구분할 수 있다. 수문 순환 및 오염물질 운송기작을 고려한 모형은 대부분 결정론적 모형으로서, 모의과정 (process)에 따라 매개변수의 공간적 변화를 고려하지 않는 집중형 모형 (lumped model), 공간적 변화를 고려하는 분포형 모형 (distributed model)로 구분할 수 있다 (chow, 1972; singh, 1995; 윤용남, 2008, 강문성 등, 2012).

분포형 모형은 장방형 격자나 삼각형 등으로 유역을 세분하고, 각 격자 또는 요소에 대하여 수문과 토양침식, 비점원 오염 운송기작을 고려한다. 이에 반해서, 총괄형 모형은 유역 내 수문단위나 오염원 등의 공간분포를 고려하지 않는 경우를 의미한다. 분포형 모형에는 ANSWERS (Beasley et al., 1980), SWRRB (Williams et al., 1975), HSPF (Hydrologic Simulation Program-FORTRAN, Johanson et al., 1982; Barnwell,

1982), AGNPS, SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1993) 등이 있다. 총괄형 모형에는 CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, Knisel, 1980), EPIC (Williams et al., 1975), WEPP (Water Erosion Prediction Project, Foster and Lane, 1987), 그리고 GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System, Leonard et al., 1987) 등이 있다 (강문성 등, 2008; 강문성 등, 2012).



(그림 2-8) 모형의 일반적 구분 (Chow et al., 1972)

또한, 수문사상을 기준으로 단일 홍수사상 모형 (storm event model)과 연속 모형 (continuous model)으로 나누기도 한다. 단일 홍수사상 모형에는 AGNPS, ANSWERS 등이 있으며, 연속 모의 모형에는 STORM (Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model), GWLF (Generalized Watershed Loading Function), 그리고 SWAT 모형 등이 이에 속한다. SWMM, HSPF, DR3M-QUAL (Distributed Routing Rainfall Runoff Model-Quality) 모형 등은 홍수사상 및 연속 모의가 모두 가능한 모형이다.

물순환 해석 등의 모형은 적용 대상지역을 기준으로 도시모형 (urban model)과 농업 모형 (agricultural model)으로 구분하기도 한다. 도시지역의 수문/수리/수질모형은 HSPF, SWMM, STORM, DR3M-QUAL, 그리고 MOUSE (Hydroworks, Model of Urban Sewers) 모형 등이 있다. 농업지역의 수문/수리/수질모형으로는 ANSWERS, CREAMS, GLEAMS, EPIC, AGNPS, AnnAGNPS, 그리고 SWAT 모형 등으로 구분된다. 또한, 도시와 농촌이 혼재된 유역에 적용성이 뛰어난 수질모형으로는 GWLF과 HSPF 등이 있다. 모형의 적용 지역에 대한 공간적 범위에 따라 지점모형 (point model), 포장모형 (field-scaled model)과 유역 모형 (watershed model)으로 나눌 수 있으며, Srivastava et al. (2007)은 유역의 공간적 범위의 모형에 대한 입력 기상자료, 수문 순환, 지하수 거동, 잠재증발산량, 토양유실 등의 모의 기법, 오염물질 모의 항목, 시간에 대한 출력 형태, 개발자, 해당 웹사이트를 체계적으로 정리한 바 있다.

집중형 모형에는 TANK 모형, HEC-HMS, SSARR 모형 등이 있다. 최근에는 모형의 결과에 대한 불확실성과 오차를 줄이기 위해서 결정론적 모형에 추계학적 모형을 적용하는 병용모형 (hybrid model)의 적용성에 관한 연구도 시도되고 있다 (Obropta and Kardos, 2007). 또한, 수문 모형은 모형의 복잡성, 계산시간 등에 따라 simple method, mid-range method, detail method 등으로 구분하기도 한다 (강문성, 2008). 물순환 모형의 구분 및 종류를 정리하면 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 수문모형의 구분 및 종류

분류 기준	종류	모형
적용대상지역	도시모형	HSPF, SWMM, STORM, DR3M QUAL, MOUSE
	농업모형	ANSWERS, CREAMS, GREAMS, EPIC, AGNPS, AnnAGNPS, SWAT
수문사상	홍수사상 모형	AGNPS, ANSWERS, SWMM, HSPF, DR3M-QUAL
	연속형 모형	STORM, GWLF, SWAT, SWMM, HSPF, DR3M-QUAL
공간적 범위	지점모형	RZWQM
	포장모형	CREAMS, GLEAMS, CREAMS-PADDY, EPIC
	유역모형	HSPF, SWMM, STORM, ANSWERS, AGNPS, AnnAGNPS, SWAT, GWLF, HEC-HMS
매개변수의 공간적 변화 고려 유무	집중형 모형	TANK 모형, HEC HMS, SSARR
	분포형 모형	ANSWERS, HSPF, AGNPS, SWAT

이상과 같이 최근까지 국내외에서 수리·수문 해석과 관련하여 연구가 이루어져 왔으나 국외에서 개발된 수문, 수리, 수질 모형은 우리나라의 기상, 토양, 작물, 지형, 기후, 토지 이용 등 환경조건이 상이한 조건에서 개발된 모형들로서, 우리나라 환경조건이 가지는 특징을 반영하는 데에는 한계가 있는 실정이다. 이는 우리나라 농촌유역의 수문 순환은 대상 지역의 특성, 범위에 따라 다르며, 이에 따라 모의 요소와 해석 기법도 다르기 때문이다.

우리나라 농업 유역은 논, 용배수로, 농업용 저수지가 존재하여 국외에서 개발된 모형의 적용 지역과 특성이 다르다. 따라서 대상지역, 환경조건, 적용 목적 등에 따라 적절한 적용기법을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서 개발할 농촌용수 물순환 해석 모형의 공간적 범위는 저수지 상류유역, 농업용 저수지, 저수지 하류유역으로 구분되는 농촌유역이다. 농촌용수 모의요소의 해석기법은 이상의 기 개발된 모형의 해석기법을 바탕으로 우리나라 현실에 맞게 수정·개선하여 적용할 필요가 있을 것으로 사료된다.

1.2. USEPA 선정 주요 물순환 모형의 특성

USEPA (2008)에서는 AGNPS, STEPL, GWLF, HSPF, SWMM, P8-UCM, 그리고 SWAT 등을 주요 유역 수문/수질모형으로 선정하였다. 강문성 (2009; 2012)은

USEPA에서 선정한 주요 수문/수질모형의 특성을 <표 2-3> - <표 2-6>과 같이 정리하였다.

<표 2-3>은 유역의 전반적인 특성 및 도시와 농업지역 특성에 따른 모형의 적용성 여부를 비교하여 나타내고 있다.

<표 2-3> 유역특성과 토지이용 특성에 따른 모형의 적용성

Land and Water Feature	AGNPS	STEPL	GWLF	HSPF	P8-UCM	SWAY	SWMM
General Land and Water Features							
Urban	—	○	▶	▶	▶	▶	●
Rural	●	○	▶	●	○	●	▶
Agriculture	●	○	▶	●	○	●	○
Forest	—	○	▶	●	○	●	○
River	—	—	○	●	○	○	○
Lake	—	—	—	▶	—	○	○
Reservoir/impoundment	—	—	—	▶	▶	○	▶
Estuary (tidal)	—	—	—	—	—	—	—
Coastal (tidal/shoreline)	—	—	—	—	—	—	—
Detailed Land Features							
Air deposition	—	—	—	○	—	—	—
Wetlands	—	—	—	▶	○	○	○
Land-to-land simulation	○	—	—	○	—	—	—
Hydrologic modification	—	—	—	▶	—	—	▶
BMP siting/Placement	●	—	—	○	▶	—	▶
Urban Land Management							
Street sweeping and vacuuming	—	—	○	—	▶	○	▶
Nutrient control practices (fertilizer, Pet waste management)	▶	—	—	○	○	○	○
Stormwater structures (manhole, splitter)	—	—	—	—	○	—	▶
Detention/retention ponds	▶	—	—	○	▶	○	▶
Constructed wetland processes	—	—	—	—	○	○	○
Vegetative practices	▶	—	○	○	○	○	○
Infiltration practices	—	—	—	○	○	—	—
Rural Land Management							
Nutrient control practices (fertilizer, manure management)	●	○	○	●	—	●	○
Agricultural BMPs (contouring/terracing/row cropping)	●	○	○	●	—	●	○
Irrigation practices/tile drains	○	—	—	—	—	●	—
Ponds	▶	—	—	▶	▶	▶	▶
Vegetative practices	▶	○	○	○	—	▶	—

Key: — Not supported
 ○ Low Simplified representation of features, significant limitations
 ▶ Medium: Moderate level of analysis, some limitations
 ● High: Detailed simulation of processes associated with land or water feature

Source: USEPA. 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs. EPA/600/R-05/149. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05149/600r05149.htm

<표 2-4>는 주요 유역수질모형에 대한 각각의 모형의 셋업 (setup) 및 적용에 소요되는 시간, 숙련도 여부, 구입비용 등을 비교하여 나타내었다. <표 2-5>는 주요 유역수질모형의 적용을 위한 기본적인 입력자료를 각각의 모형별로 비교하여 보여주고 있다. <표 2-6>은 주요 모형의 보정을 위하여 대표적으로 선택할 수 있는 유출과 오염물질을 나타내고 있다. 모형의 보정은 실측자료와 모의자료의 회귀방정식, 상대오차, 모형의 효율지수, 그리고 Student's t-test 등을 통하여 수행할 수 있다.

<표 2-4> 모형의 사용 적합성 특성 비교

Application Considerations	AGNPS	STEPL	GWLF	HSPF	P8-UCM	SWAY	SWMM
Experience required	●	●	●	—	●	○	—
Time needed for application	●	●	●	—	●	●	○
Data needs	●	●	●	○	●	●	○
Support available	●	○	○	●	○	●	●
Software tools	●	●	●	●	○	●	○
Cost to purchase	●	●	●	●	●	●	●

Experience:

- Substantial training or modeling expertise required (generally requires professional experience with advanced watershed and/or hydrodynamic and water quality models)
- Moderate training required (assuming some experience with basic watershed and/or water quality models)
- Limited training required (assuming some familiarity with basic environmental models)
- Little or no training required

S u p p o r t
Available

- | | | | | |
|----------|--------------|----------|-----------------|------------------------------|
| — None | — > 6 months | — None | ○ High | — Significant cost (> \$500) |
| ○ Low | ○ > 3 months | ○ Low | ○ Medium | ○ Nominal cost (< \$500) |
| ● Medium | ● > 1 month | ● Medium | ● Low | ● Limited distribution |
| ● High | ● > 1 month | ● High | ● Public domain | |

Source: USEPA. 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs. EPA/600/R-05/149. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory Cincinnati OH. www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05149/600r05149.htm

<표 2-5> 모형의 입력자료 특성 비교

Model	Number of Watersheds	Land-Use/Soil Parameters	Stream Channel characteristics	Nutrient Applications	Management Practices
AGNPS	> 1	CN/USLE	N/A	Application rate	Location and type associated with land use
STEPL	1	CN/USLE	N/A	N/A	General type
GWLF	1	CN/USLE	N/A	Manure/nutrient applications, date	General /agricultural
HSPF	> 1	HSPF-specific	Flow/discharge relationships, length	Application rate	Location and type
P8-UCM	1	CN/USLE	N/A	N/A	General type
SWAT	> 1	CN/USLE	Dimensions of stream channel	Application rate	location and type associated with land use
SWMM	> 1	Green-Ampt USLE	Dimensions of stream channel, conduits, and Pipes	Buildup /wash-off rates	Location and type associated with land use

<표 2-6> 모형의 수문/수질 보정 매개변수 비교

	Flow calibration	pollutant calibration
AGNPS	Limited CN	Nutrient concentrations in water and sediment
STEPL	Limited/CN only	Loading rate
GWLF	Ground water recession	Nutrient concentrations in water (runoff, ground water) and sediment
HSPF	Multiple, infiltration, soil storage, ground water	Pollutant buildup and wash-off, instream transport/decay
P8-UCM	Limited/CN only	Loading rate or more detailed buildup and Wash-off of dust and pollutants
SWAT	Ground water	Nutrient concentrations in water and sediment
SWMM	Multiple, infiltration, soil storage, ground water	Pollutant buildup and wash-off, instream transport/decay

1.3. 수문모형의 개발현황

수문모형의 개발은 시간적 기술의 발달에 따라 구분하면, <표 2-7>과 같이 크게 5 단계로 요약할 수 있다. 본 연구의 분류는 미국에서 개발된 모형을 위주로 분석한 것이라는 한계가 있지만, 사실상 미국에서 개발된 모형이 국내는 물론 세계적으로 매우 널리 사용되고 있다는 점에서 전반적으로 모형의 발전단계를 고찰하는데 매우 유용할 것으로 사료된다.

<표 2-7> 기술발전 단계별 수문·수질모형의 개발 현황

구분	'70s	'80s	'90s	'00s	현재
	개발단계	개발완성	적용단계	응용단계	통합 단계
컴퓨터 기술	Mainframe Computer	Mini-computer	Micro-computer	Micro-computer (Windows+wep) GUI&Pre/Post process	Internet & Remote DB
모형의 종류	WASP SWMM STORM QUAL MIT-DNM SWM TANK	HSPF EPIC WASP3 CE-QUAL HEC-RAS HEC-HMS	SWAT WEPP CREAMS GLEAMS CE-QUAL-ICM EFDC	HOMWRS BASIN SWMM5 EFDC-WASP	Linkage of Hydrodynamics, watershed, atmospheric models + decision support

기술발전 단계별 수문해석 모형은 과거 40년 동안 다양한 공간적 규모에 대한 수문 순환, 수리학적 거동 그리고 오염물질 기작 및 이송 과정을 모의하기 위하여 개발되어 현재에 이르고 있다. 물순환 해석 모형의 개발은 1970년대에 본격화되어 1980년대에 현재 이용되고 있는 대부분의 모형의 알고리즘과 그에 따른 개발이 완성되었다. 이러한 모델링 기법은 1990년대 이후 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 성능 및 기술의 향상으로 수문·수질 모델링과 관련된 연구가 가속되었다. 현재에는 지리정보시스템과 원격탐사, 사용자편의시스템, 객체지향 모델링 기법 등의 새로운 기술이 통합되어 발전되어 오고 있다. 다음은 물순환 해석 모형의 단계별 기술발전 현황을 간략히 정리하고 있다.

1단계는 1960년대에서 70년대 중반까지에 해당되며, 기본적으로 Mainframe 컴퓨터의 개발과 함께 시작된 최초의 현대적 수문 모형의 개발 단계이다. 모형의 입력자료를 준비하고 일련의 순서에 따라 컴퓨터에 공급하며, 출력결과를 마그네틱 테이프에 저장하여 차후에도 활용이 가능하도록 하는 형태로서, 지금에서 보면 매우 원시적인 형태이다. 하지만 이 당시에 모형의 알고리즘은 상당한 수준으로 개발되어 있었으며, 이 시기에 개발된 모형으로 WASP (Water quality Analysis Simulation Program), SWMM, 초기 QUAL (stream water QUALity model), SWM (Stanford Watershed Model) 모

형 등이 있다.

2단계는 중앙정부에서 주로 운용되던 Mainframe에서 컴퓨터 기술의 발전으로 Minicomputer가 주요 기관단위로 컴퓨터의 보급 확대되면서 컴퓨터에 대한 접근성이 향상되었던 80년대 중반까지에 해당되는 시기이다. 이 시기는 기존에 개발된 모형을 더욱 정교하게 보완하고, 일반화가 이루어진 시점이다. 이 시기에 개발된 모형으로는 HSPF, WASP3, CE-QUAL, HEC-RAS, DSS, HMS 등이 있다.

3단계는 1990년대 중반까지 시점에 해당되며, DOS 기반의 개인용 컴퓨터(Microcomputer)의 등장으로 컴퓨터의 사용이 획기적으로 늘어난 시기로 개별 사무실 단위에서도 컴퓨터를 사용할 수 있게 된 시기이다. 모형의 더욱 진화하여 어느 정도 표준화 단계에 접어들게 되고, 모형의 배포나 교육, 기술적인 지원 등이 체계화되는 시기이다. 이때 개발된 주요 모형으로 보다 향상된 HSPF, EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code), CE-QUAL-ICM 등이 있다.

4단계는 2000년대 초기로 Windows 기반의 컴퓨터로의 진화함으로서, 다양한 사용자 편의 인터페이스가 개발되어 모형 적용의 편의성이 획기적으로 진전된 시기이다. 또한 GIS tool을 이용하여 지형 등 공간자료를 모델링에 적용하는 기술이 일반화 되는 시기이다. 주요 모형으로 SWMM5, BASINS (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) 등의 모형이 있다.

5단계는 현재 단계로 인터넷의 발달과 컴퓨터 전산기술의 진전으로 개인용 컴퓨터가 과거의 슈퍼컴퓨터 수준의 기능까지 수행할 수 있게 됨에 따라 계산상의 한계가 어느 정도 극복되고 네트워크를 통한 원격 모델링 기법이 적용가능하게 되었다. 또한 유역 단위 공간자료 및 기초자료 DB를 활용하고, 실시간 계측자료를 모의에 활용하며, 기후변화를 고려할 수 있는 등 모델링의 정도를 향상시키고 있다. 현 단계에서는 이러한 모형 예측 결과를 의사결정에 활용하는 보다 통합적인 관점에서 DB, 수문·수질 모형, 의사결정지원 등의 여러 시스템을 통합하는 방향으로 나아가고 있다.

2. 저수지 상류유역 물순환 해석

2.1. 장기유출해석

장기유출량 자료는 저수지와 댐의 용량 결정, 가뭄대책 수립, 하천유지용량 결정 등이 수측면에서 중요한 요소이다. 그 중 가장 정확하게 유출량 자료를 획득할 방법은 직접적인 유량측정을 실시하는 것이며, 우리나라는 지속적인 투자를 통하여 세계적인 수준의 수문관측 시스템을 갖추게 되었다. 그러나 모든 유역에 대하여 고비용의 수문관측시스템을 구축하는 것에는 어려움이 있으며 관측된 수문자료 또한 축적된 정도가 부족하고 실측자료가 일부 존재하는 등 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있어 이를 이용하는 것에 어려움이 존재한다. (Im et al., 2007; 최호훈과 이효상, 2012) 부족한 유출량 자료를 모의하는 방법으로는 경험식에 의한 방법, 비유량법 등 여러 가지가 있으나 강우-유출모형을 이용하여 모의하는 것이 일반적이다 (김계웅 등, 2014).

강우-유출 모형은 수문학적 계산 시간을 고려하는 방법에 따라 연속모형(continuous model)과 사상모형(event model)로 구분할 수 있다. 사상모형은 직접 유출량을 계산하는데 주로 사용되는 모형으로 단기유출해석에 주로 사용되며, 연속모형은 중간유출, 기

저유출을 포함한 모든 유출성분을 고려하여 모의하는 모형으로 장기유출량 해석에 주로 사용된다. 장기유출을 모의할 수 있는 수문모형은 1960년 이후 지속적으로 개발되고 있으며

SWM-IV (Standford Watershed Model-IV) 모형은 Crawford와 Linsley (1966)에 의하여 개발된 모형으로서, 여러 유역의 다양한 수문 조건 등을 고려할 수 있으며, 복잡한 수문순환 과정의 일반적인 모든 부분을 포함하고 있어 널리 이용되어 왔다.

SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) 모형은 미육군 공병단 (US Army Corps of Engineers, 1991)에 의해 개발된 모형으로 세분화된 토양층에 의하여 수분저류량이 계산되고, 유역추적, 하도추적, 저수지 조작 모형 등을 포함하고 있으며 강우뿐만 아니라 강설에 따른 유출해석도 가능하다. 강민구 등 (1997)는 관개용 저수지 시스템의 거동분석을 위하여 SSARR 모형을 적용하였으며, 이상진 등 (2010)은 SSARR 모형을 이용하여 대청댐 유입량을 예측하고 대청유역 물수지를 분석한 바 있다.

NWSRFS (National Weather Service River Forecasting System) 모형은 미국 국립 기상청 (US National Weather Service, 1972)에 의하여 개발된 모형으로 강수는 물론 눈의 축적 및 용설, 토양함수 계산, 유출, 하도추적 등을 포함함으로써 미국 기상청에서 공식적으로 이용하고 있는 모형이다.

Tank 모형은 Sugawara (1995)에 의하여 개발된 단일 탱크의 선형시스템 모형으로서 홍수유출이나 장기유출에 적용되고 있다. Tank 모형은 임의의 집수유역을 여러 개의 저류형 탱크로 가상하여 유역의 지표유출, 중간유출, 기저유출을 산정한다. 국내에서는 김현영과 박승우 (1986)가 유역특성에 따른 Tank 모형의 매개변수 변화를 평가하였으며, 김현영 (1988)이 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생을 위해 Tank 모형을 적용하였다. 허유만 (1992)은 중소유역의 일별 용수수급해석을 위한 하천망 모형의 개발에 Tank 모형을 이용하였으며, 박승우 (1993)는 일유출량 추정을 위하여 Tank 모형 셀프프로그램을 개발하였다. 또한, 박창언과 박승우 (1994)는 영산호 운영을 위한 홍수예보모형 개발에 Tank 모형을 적용한 바 있다.

SHE (Systeme Hydrologique Europeen) 모형은 영국의 수문연구소 (Institute of Hydrology)와 덴마크의 수리연구소 (Danish Hydraulic Institute) 및 프랑스의 전문 용역회사인 SOGREAH가 공동으로 개발한 모형으로서 (Abbott et al., 1986), 용설, 차단, 증발산 및 지표류와 하천류, 토양 내의 물 이동까지 모의가 가능하다.

MIKE SHE WM (Water Movement) 모형은 수문학적 순환 과정에 기초하여 지표면에서의 흐름 및 저류량 등의 변화를 모의 운영하는 모형으로 표면수 및 지하수 관리와 비점오염도, 토양침식 등에 관련된 광역 수자원 문제에 적용이 가능하다.

MIKE 11 모형은 덴마크 DHI (Danish Hydraulic Institute)에서 개발된 일차원 하천 모형으로 하천이나 하구에서의 흐름 모의, 유사 이송 해석, 수질 해석뿐만 아니라 강우유출 해석도 가능하다.

TOPMODEL 모형은 Beven (1989)이 개발한 개념형 수문모형으로 수치고도자료와 토양, 식생자료 등을 이용하여 유역의 토양수분 분포를 예측하고, 지하흐름을 산정하며 유출에 기여하는 동적 포화기여지역 개념을 이용하여 유출을 모의한다. 조홍제 등

(2000)은 TOPMODEL을 이용하여 장기유출을 해석하였고 이학수 등 (2001)은 지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석을 연구하였으며, 강성준과 박영기 (2011)은 미계측유역에 대한 TOPMODEL의 적용성을 평가하였다.

SFB (Surface infiltration Baseflow)모형은 Boughton (1984)에 의해 개발된 모형으로서 2개의 토양층으로 구분하여 지표유출과 기저유출을 각각 모의한 뒤 총유출량을 결정한다.

Xinanjiaing 모형은 Zhao et al. (1995)에 의해 개발된 모형으로 수 개의 토양층을 구분하고, 통기층의 토양수분이 포장용수량에 도달한 후 유출이 발생한다는 가정 하에 습윤 및 반습윤 지역인 중국의 여러 유역에서의 직접유출과 기저유출 산정에 광범위하게 적용되고 있다.

PRMS (Precipitation Runoff Modeling System) 모형은 미국 지질조사국 (US Geological Survey, 1983)에서 개발한 모형으로서 유역의 물리적 과정에 기반을 두고 유역의 토지이용, 강수 및 기후변화 등의 영향을 평가할 수 있도록 개발되었다.

MODHYDROLOG (Modified HYDROLOG) 모형은 Porter와 McMahan (1976)에 의해 개발된 HYDROLOG 모형을 Chiew et al. (1993)이 수정한 모형으로서, 5개의 저류탱크를 이용하여 유출량을 산정한다.

ARNO 모형은 Todini (1996)에 의해 개발된 모형으로 토양수분량의 공간적 분포 확률과 포화기여면적의 동적 변화를 고려하여 유출량을 모의한다.

HBV-96 모형은 Bergstrom (1995)의 HBV 모형을 Lindstrom et al. (1997)이 수정한 모형으로서 3개의 토양층으로 구분하고 직접유출과 기저유출을 산정한다.

SWAT 모형은 유역을 토지이용 및 토양에 따른 HRU 격자단위로 해석하는 준분포형 모형으로 유역 내 변화상태를 반영할 수 있으며 지리정보를 바탕으로 유역의 물리매개변수를 결정한다. 최근 지리정보시스템이 발달함에 따라 더 정교한 수문매개변수의 수집이 가능해지면서 SWAT 모형의 사용도가 증가하고 있다 (박진혁 등, 2007). 국내연구로 김지훈 등 (1998)은 시험유역에서 지리정보시스템을 이용하여 SWAT 모형을 모의한 후 실측자료와의 비교를 통해 적용성 검토를 실시하였으며, Kang et al. (2006)은 SWAT 모형을 이용하여 논을 포함한 소유역에서의 수질을 모의하고, 오염총량모의시스템의 개발에 사용하였다. 김학관 등 (2009)은 다중목적 최적화기법을 이용하여 발안저수지내 시험유역을 대상으로 SWAT 모형 수문매개변수 자동보정을 실시하였다. 최근에는 김철겸과 김남원 (2012)이 SWAT 모형을 한강유역의 자연유출량 산정에 이용하여 TANK 모형의 결과와 비교하는 연구를 진행하였다.

이와 같은 다양한 장기유출모형이 사용되고 연구되고 있으며 최근에는 지형특성을 반영한 분포형 모형의 사용이 점차 증가하고 있다. 그러나 현재까지도 미계측 유역과 같이 기상 및 토양, 토지이용 등 유역의 물리적 특성에 대한 자료 수집이 곤란한 경우에 대해 개념적 모형이 여전히 유용하게 이용되고 있다 (김현준, 2001; 김철겸과 김남원, 2012; 강민구 등, 2013). 또한, 모형의 매개변수에 물리적 의미를 부여하고 해석하는 일은 쉽지 않아, 수문모형의 신뢰성에 대한 문제가 제기된 바 있다 (Beven, 1989; Woolhiser et al., 1990). Beven (1989)에 따르면, 많은 매개변수는 불확실성을 증가시켜 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있으며, 모형의 매개변수 개수는 3~4개면 충분하다고 보고

한 바 있다. Hornber et al. (1985), Loague and Freeze (1985)는 여러 수문모형의 적용결과 단순한 모형이 복잡한 것보다 좋은 예측 결과를 보여준다고 하였다 (김현준, 2001; 김계웅 등, 2014).

2.2. 오염부하량 모의

수질 모의를 위한 유역모형은 주로 농공학분야 특히 농지보전공학 (Soil and Water Conservation Engineering) 부문에서 많은 발전을 이루어 왔다. 최근에 많이 사용되는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)의 경우 과거에 개발된 포장단위 (field-scale)모형인 GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management System), CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems), EPIC (Environmental Impact Policy Climate; Erosion Productivity Impact Calculator)등을 비롯하여 하천수질모형인 QUAL2E, 유역단위 모형인 SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)로 부터 직접적인 영향을 받아 만들어졌다. SWAT 모형은 지속적인 보완이 이루어지고 있으며, 최근에는 수문, 유사, 영양염류, 농약, biomass 뿐만 아니라 박테리아와 중금속까지 모의할 수 있게 발전되었다. 농업지역의 유역단위 수문/수질 모의에는 SWAT 이외에도 AGNPS, ANSWERS 등의 모형이 있으나, 모형보완 및 관리가 꾸준히 이루어 지지 않아 이들 모형의 활용은 줄어드는 추세이다. 이외에도 국내에 소개된 수질 모형으로 Street-Phelps, Vollenweider, CE-THERM, WASP5, CORMIX I, CORMIX II, WQRRS, FASTTABS, CE-QUAL, HEC-5Q 등 여러 가지가 있다. 이들 수질모형은 지역적 조건에 따라 적합한 모형이 선택/이용되어야 한다. 이들 유역 수질모형의 장점은 구체적인 수문/수질 모의과정을 모사할 수 있고, 시나리오 분석을 통한 여건 변화에 따른 대책 수립이 가능하다는 점이다. 하지만, 지형 조건 관련 매개변수가 많아 모의과정을 복잡하게 하며, 보정 과정에 있어 많은 시간과 노력을 요구하는 단점이 있다. 이에 관측된 유량 및 수질 자료를 바탕으로 통계기법을 통해 수립한 유량-부하량 관계식으로 오염물질 유출량을 추정하는 방법과 관측치에 크게 의존하지 않고 간단하게 오염물질 유출량을 추정할 수 있는 원단위법 또한 많이 사용되고 있다.

원단위법은 우리나라에서 널리 사용되는 방법으로, 각 토지이용의 특성과 오염물질의 부하량간에 경험적인 관계를 이용하여 유역의 총 부하량을 추정하는 방법이다. 원단위법은 사용 방법이 간단하다는 장점이 있지만, 수문학적 요인에 의한 유출량 변동을 고려하기 어렵고 단순히 토지이용에 의해서만 추정되기 때문에 산정결과에 불확실성이 큰 단점이 있다. 하지만 계측 데이터 없이도 수질 모의가 가능하다는 장점 때문에 수문 및 수질 계측망이 거의 구축되어 있지 않은 농업용 저수지 상류유역에는 효과적인 수질 모의 방식이라고 할 수 있다. 또한, 농업용 저수지 상류유역은 대체로 산림, 농경지 등으로 이루어진 단순한 토지이용 구성을 가지기 때문에, 토지이용이 복잡한 유역에 비해 비교적 정확한 모의가 가능할 것으로 사료된다 (엄명철, 2004).

오염부하량 모의 회귀식은 실측된 유량 및 수질 데이터를 통계 분석하여 회귀식을 산정하고, 수문모형이나 실측을 통해 구축된 유량자료를 회귀식에 대입하여 유역에서의 오염부하량을 모의하는 방법으로 우리나라와 유역 특성이 비슷한 일본에서 비교적

많이 사용되었다. 오염부하량을 모의하는 회귀식은 다양한 형태가 존재하며, 최근에는 LOADEST (LOAD ESTimation)를 이용하여 회귀식을 개발하는 연구가 증가하고 있다. LOADEST는 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 개발한 회귀식 기반 프로그램으로 다양한 연구자들에 의해 이용되고 평가되고 있다.

국외에서는 Stenback et al. (2011)가 질소와 인의 부하량 추정에 있어 LOADEST 모형에 포함된 9번 회귀식의 적용성을 검토하였으며, Carey et al. (2011)은 LOADEST 모형을 이용한 질소와 인 오염부하량 경향분석 결과, Pollutant Index가 수질개선을 위한 유역관리에 도움이 될 수 있다고 보고하였다. Jha et al. (2013)은 LOADEST 모형의 회귀식들 중 가장 좋은 모의결과를 도출하는 회귀식을 자동선택하는 시스템을 개발하여 질소와 인의 부하량을 모의하고 평가하였다. Das et al. (2013)은 Yarra강 유역에서 기후변화와 토지이용현황이 부하량에 미치는 영향을 LOADEST 모형을 이용하여 분석하였다.

LOADEST 모형을 이용한 회귀식 개발은 대부분 국외의 다양한 국가, 유역에서 진행되어 왔으며, 국내에서는 몇몇 연구자들에 의해 적용성이 평가되고 있는 상황이다. 신민환 등 (2009)과 장원석 등 (2011)은 농촌 소유역과 하천을 대상으로 NI 방법, ESTIMATOR 모델, LOADEST 모델을 이용하여 오염부하를 산정하고 비교·평가하였으며, 박윤식 등 (2015)은 LOADEST 모형을 이용하여 한강수계의 유역을 대상으로 부유사를 예측하고 평가하였다.

유출량 해석과 관련된 연구에서는 회귀식의 미계측 유역 적용을 위해 개념적 수문모형이나 회귀식의 매개변수를 지역화하는 연구가 다수 진행되어 있다. 국외에서는 Yokoo et al. (2001), Heouvelmans et al. (2006), Young (2006), Hundecha et al. (2008) 등이 유출량 모의를 위한 회귀식 계수와 모형 매개변수를 지역화하는 연구를 진행한바 있으며, 국내에서도 개념적 모형인 탱크모형의 매개변수를 지역화하는 연구를 다양한 연구자들이 진행해온바 있다 (김현영과 박승우, 1988; 허유만 등, 1992; 김선주 등, 2000; 안지현, 2013). 이와 같이 유출량 해석분야에서는 개념적 모형과 회귀식을 미계측 유역에 적용하기 위해 매개변수 지역화를 위한 다양한 시도가 이어져 왔으나, 오염부하량 산정의 경우 1986년 미국에서 Driver와 Tasker가 미국의 도시유역을 대상으로 토지이용 및 기후특성을 고려한 강우시 오염부하량 모의 회귀식을 개발한 이래로 국내외적으로 오염부하량 회귀식을 미계측 유역에 적용한 연구사례는 부족한 상황이다.

3. 저수지 수문·수질 및 모의조작

3.1. 농업용수 공급량 모의

농업용수 공급량 (agricultural water supply)은 관리자가 수리시설물에서 관개지구로 실제로 공급하는 용수량을 의미하며 농경지에서 작물재배를 위해 이용되는 필요수량 (irrigation water requirement), 수로에서 손실되는 송수 손실 수량 (conveyance loss), 그리고 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀하는 배분관리 용수량 (delivery management water requirement)을 포함한다 (송정현, 2013; 송정현 등, 2013a).

농업용수 공급량과 관련된 연구는 농업용 저수지의 용수공급능력과 수요량을 고려하

여 저수지의 물 공급 취약성을 평가하는 연구 (남원호 등, 2012)가 수행된 바 있다. Yoo et al. (2013)은 기후변화와 이에 따른 토지이용 및 생육시기 변화를 고려하여 미래 농업용 저수지 수요량을 산정하였다. 여기서, 관개효율은 지역별 특성을 고려하여 저수지별로 80~90%가 적용되었으며 시간에 따른 변화는 고려되지 않았다. 또한, 송정현 등 (2013a)은 농업용수 공급량 모형과 논 광역 배수량 모형을 연계하여 복합영농 관개지구의 배수량을 모의하였으며, 여기서 송수 효율은 95%, 그리고 배분 효율은 현장의 실측치를 반영하여 73%가 적용된 바 있다. 이상의 연구들은 농업용수 공급량에 대한 정확한 추정이 기반되어야 하며, 이는 장래 용수수요 추정, 용수수급 계획, 관개 조직의 운영 등 수자원 관리 계획 수립에 있어 중요한 요소로 작용한다.

농업용수 공급량 조사를 위한 가장 정확한 방법은 용수로의 시점부에 장비를 설치하여 연속 측정하는 것이다. 최근에는 농촌수자원 스마트 물관리를 위하여 첨단 센서 네트워크를 이용하여 실시간으로 농업용수 공급량을 측정하는 지역이 있으나 (박창언 등, 2012; 남원호 등, 2013), 모니터링 방법은 우리나라 수리시설물의 수, 이용범위의 광범위성, 여러 곳에 산재되어 있는 특성을 고려하면 현실적으로 불가능하다 (Im et al., 2000).

일반적인 용수 공급량 조사 방법은 필요수량을 모의 후 관개효율을 고려하여 산정하는 것이다. 하지만 실제 공급량은 수리시설물 관리자가 주민의 요구 및 관행적인 경험을 고려하여 운영하는 것이지 (남원호 등, 2011), 필요수량을 모의 후 용수 공급을 결정하는 것이 아니다. 따라서 필요수량 기반으로 추정되는 용수 공급량이 실측 공급량을 반영하는지에 대한 평가 및 연구가 필요하다.

기존의 용수수요량 추정방법은 농림부 (1997)에서 제시하는 방법을 이용하는데, 이 방법은 논물의 담수는 모내기과 동시에 실시하는 것으로 설정하여 공급량을 모의하기 때문에 4, 5월의 공급량이 과소 모의된다 (주옥종 등, 2006). 농업기반공사 (2005)에서 전국을 대상으로 영농방식을 조사한 결과 중간낙수 시기에는 저수지에서 용수를 공급하지 않으며, 논물의 담수는 모내기 이전인 4월 중순부터 시작하는 것으로 보고하고 있다. 또한, 이용직 등 (2006)에 따르면 기존 작부시기가 현장의 물관리를 반영하지 않아 4~5월의 실측 공급량이 모의 공급량에 비해 5배 이상 차이가 나타나는 것으로 보고하였다. 이를 개선하기 위해 농업기반공사 (2005)와 주옥종 등 (2006)은 기존에 적용되던 작부시기 (농림부, 1997)에서 논물가두기 시기를 추가하여 담수가 4월부터 시작되도록 수정하였으며, 이 시기에 증발 및 침투에 의한 필요수량이 모의가 되도록 개선하였다. 또한 중간낙수 시기에 용수 공급이 중단되는 기작을 추가하였다. 송정현 등 (2013a)과 강민구 등 (2014)은 이와 같은 개선된 방식 (농업기반공사, 2005; 주옥종 등, 2006)을 이용하여 공급량을 모의한 결과, 영농초기와 중간낙수기의 모의치가 기존 방식에 비해 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 보고하였다. Im et al. (2000)는 수정 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)의 저수율 모의 결과와 실측 저수율이 일치되도록 조정하는 방류계수 매개변수를 도입하여 농업용수 공급량을 산정하는 방법을 개발하였으나, 논물가두기와 중간낙수 시기를 고려하지는 않았다. 이상과 같이 농업용수 공급량은 수리시설물 관리자의 운영에 의해 결정되는 인위적 요소이나, 필요수량 기반으로 모의하기 위하여 작부시기를 개선하거나 새로운 매개변수를 도입

하는 연구가 이루어져왔다. 하지만 기존의 연구에서는 공급량 모의 관련 주요 매개변수에 대한 민감도 분석, 보정 및 검정에 관한 연구는 미흡했다. 즉, 물꼬 높이, 침투량, 최소 담수심, 그리고 관개효율 매개변수를 어떠한 값을 선정하느냐에 따라 모의 결과는 크게 달라질 수 있으나 이에 대한 고려 및 정량적 평가가 부족했다. 특히, 관개효율 매개변수는 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이 모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다 (임상준 등, 2000b; Kim et al., 2005). 따라서 주요 매개변수에 대한 민감도 분석과 보정된 매개변수가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 정량적 평가를 수행할 필요가 있다. 또한, 공급량 실측치가 확보되지 않은 경우 보정 및 검정을 수행할 수 없기 때문에 문헌에 제시되는 매개변수 값을 이용하게 되는데, 이에 따른 모의 결과가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 평가 또한 필요할 것이다.

3.2. 저수지 물수지 해석 및 모의조작

저수지의 운영은 수자원 관리의 중요한 요소로 효율적인 저수지 관리는 지역의 지속 가능한 발전에 이바지 한다 (Reddy and Kumar, 2008). 이에 지난 수십년동안 기후변화 등을 포함한 여러 여건 변화를 대비하여 저수지의 물수지 및 수질을 예측하고, 현재의 저수지 운영기준을 평가하기 위하여 수문 및 수질을 해석하는 모형을 개발하는 연구가 이루어져 왔다.

저수지 조작에 대한 연구는 Ripple (1883)이 저수지의 크기와 조작을 위해 실측된 유입량과 방류량의 누가곡선 (mass curve)을 작성하여 저수량을 추정하는 방법을 제안하면서 시작되었다. Yeh (1985)는 수학적 저수지 조작 관리모형을 해석 방법에 따라 선형계획법 (linear programming), 동적계획법 (dynamic programming), 비선형계획법 (non-linear programming), 모의 발생법 (simulation)의 4가지로 구분하여 각 방법의 주요 연구에 대하여 논의하였다. Simonovic (1992)은 저수지 관리와 조작에 사용되는 물리적 모형들을 고찰하면서, 모의모형은 저수지를 여러 가지 상황에서 반복적으로 조작할 때, 저수지의 거동을 분석하는데 용이하며, 다른 모형들 보다 조작자가 사용하기 편리하다고 하였다 (강민구, 2004).

국외의 저수지 운영 모형으로는 작물의 수에 따라 단일 작물 관개를 위한 모형 (Dudley et. al., 1971; Dudley and Burt 1973; Bras and Cordova 1981)과 두 개 이상 작물의 관개를 위한 모형 (Vedula and Nagesh Kumar 1996; Nagesh Kumar et al. 2006; Ashofteh et al. 2013) 등이 개발된 바 있다. 하지만 국외 모형은 주로 토양수분 물수지 식 기반의 발작물 관개를 위해 개발되었기 때문에 우리나라와 같이 논 관개를 위해 저수지를 운영하는 지역에서는 적용할 수 없다. 국외의 대표적인 수문모형인 SWAT 모형에서도 저수지 물수지 분석 및 모의조작 기작을 지원하지만 국내에 적용한 결과를 살펴보면 모의치가 실측치의 경향을 반영하지 못 하는 것으로 나타나고 있다.

밭과 달리 논은 물꼬가 존재하여 담수 상태를 유지하는 영농활동이 이루어지기 때문에, 논은 담수기작이 저수지 물수지 모형에 반영될 필요가 있다. 국내에서는 김현영과 박승우 (1988)에 의해 저수지의 일별 물수지에 의한 농업용 저수지의 모의조작모형

(DIROM)을 개발하여 저수지 조작에 따른 저수지의 거동을 분석하였다. 한국농어촌공사에서는 DIROM 모형의 기작을 바탕으로 수리시설물 모의조작 시스템 (Hydrological Operation Model for Water Resources System, HOMWRS)을 개발하였으며 현재까지 실무에서 가장 널리 쓰이고 있다 (이태호, 2011). HOMWRS 에서는 수정 3단 Tank 모형 (김현영, 1988)을 이용해 일별 유입량을, 합리식을 이용해 순별 유입량을 산정할 수 있다. 논 관개 필요수량의 경우 일별 필요수량은 Penman식, 순별 필요수량은 Blaney-Criddle식을 적용하여 산정하며, 밭 관개 필요수량은 Penman-Monteith식을 이용해 산정한다. 기상관측소별 강수량, 온도 등 6개 기상요소와 지역별 작물계수를 DB화 하여 제공하고 있어 유입량 및 필요수량 산정 시 별도의 입력과정 없이 이용이 가능하다. HOMWRS은 이상운 (2008)이 동화댐의 하천유지용수량 산정을 위한 관개 필요수량 산정에 적용하였으며, 우재열 등 (2010)이 농업용저수지의 소수력 발전량 추정 에 적용하였다. 송정현 등 (2012)은 CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS를 연계하여 담수논을 대상으로 영농방법에 따른 배출부하량 영향을 평가하였다. 이와 같이 HOMWRS는 실무에서 농업용 저수지 운영 모형으로 가장 많이 활용하고 있다.

HOMWRS는 저수지의 설계 및 활용에 다양하게 적용되어 왔으나, 여러 한계점 및 보완해야 할 부분을 가지고 있다 <표 2-8>. 먼저, 배수량 측면에서 HOMWRS는 관개 지구 배수량을 모의하지 못한다. 농업용수 공급량 측면에서는 대부분의 논에서 현장 적용되고 있는 중간낙수 시기를 고려하지 못하며, 배분관리 용수량 (용수로 배수량)을 고려하지 않고 있다. 밭 필요수량의 경우 작부시기가 작물별로 DB화 되어 있어 활용할 수 있지만 사용자가 입력하거나 수정할 수 없는 한계가 있으며, 저수지 수위는 홍수기 현장수위가 반영되지 못하고 있다. 마지막으로 유역 유출량 (저수지 유입량) 산정 시 활용되는 TANK 모형의 매개변수가 1988년에 개발된 것으로 이후 개선되지 않았다. 이와 같이 HOMWRS는 다방면에서 보완이 필요하며, 이를 개선한 농업용 저수지 물수지 해석 모형이 필요하다.

또한, 기존의 연구에서는 저수지 물수지 모의 관련 주요 매개변수에 대한 민감도 분석, 보정 및 검정에 관한 연구는 미흡했다. 즉, 매개변수를 어떠한 값을 선정하느냐에 따라 모의 결과는 크게 달라질 수 있으나 이에 대한 고려 및 정량적 평가가 부족했다 (송정현 등, 2015b). 저수지 물수지 모의 관련 매개변수는 관개지구 특성과 관련된 매개변수 (토양 특성, 관개 효율), 영농방법과 관련된 매개변수 (물꼬 높이, 최소담수심 등), 저수지 운영과 관련된 매개변수 (관개기, 중간낙수기, 제한수위 운영시기)들로 이루어져 있다. 이들 매개변수는 임의적이고 정확하지 않아 많은 불확실성을 내포하고 있다 (Suresh and Mujumdar, 2004). 따라서 어떠한 매개변수가 농업용 저수지의 물수지 및 수질에 민감하게 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다. 또한 농업용수 공급량 모의 결과는 이들 매개변수 값으로 어떠한 값을 선택/이용하느냐에 따라 그 차이가 상당히 크게 나타나나, 매개변수 선정에 관한 기준이 모호하며 불확실성이 크다 (Yoo et al., 2013). 따라서, 저수지 물수지 분석 이전에 실측 결과와 모의 결과를 비교를 통한 매개변수의 보정 및 평가가 필요하다.

특히, 관개효율 매개변수는 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이

모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다 (임상준 등, 2000b; Kim et al., 2005; 송정현 등 2015b). 관개효율의 작은 변화는 저수지 물수지 성분에 크게 영향을 미칠 가능성이 있다. 하지만, 많은 연구에서 시간의 변화에 따른 관개효율 변화를 고려하지 않고 고정된 값을 이용하고 있다 (Ali et al. 2003; Georgiou and Papamichail 2008; Yoo et al. 2013; Kang and Park 2014; Nam et al. 2015; Fowe et al. 2015). 이러한 경우 시간에 따라 매개변수 값이 변하도록 구성하는 것이 한 방안일 수 있다 (Wu and Chen, 2012). Kangrang and Chaleeraktragoon (2007)은 또한 관개효율이 연단위로 변하도록 구성하는 것이 고정된 값보다 모의 결과가 더 우수하게 나타났다고 보고한 바 있다.

추가적으로 농업용 저수지 운영규칙을 우리나라의 여건 변화에 따라 재조정할 필요가 있다. 전통적으로 전세계 대부분의 저수지는 단일 목적으로 건설되었으나, 오늘날 많은 저수지가 홍수조절, 환경용수 공급, 레크레이션 등 여러 목적으로 이용되고 있다 (ICOLD, 2007; Li, 2010). 우리나라의 저수지 운영 목적은 농업용수 공급을 위한 단일 목적에서 최근에 홍수조절의 목적이 추가되었다. 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 수위조절장치 (수문)가 있는 저수지에 대하여 용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 제한수위를 설정하여 운영하도록 규정되어 있다. 제한수위 운영은 기존의 만수위보다 낮은 저수지 수위를 유지함에 따라 저수지 하류 하천으로 방류되는 수량이 증가할 수 있다. 즉, 제한수위를 실제로 운영하는 지역에 대해 이를 고려하지 않고 저수지 물수지 요소를 모의하면 모의 결과가 실제 결과와 상이할 수 있다. 따라서 과거의 규칙에서 현재의 여건을 고려한 새로운 운영 규칙을 개발하여 대체할 필요가 있다.

<표 2-8> HOMWRS 모형의 개선되어야 할 사항

항목	개선되어야 할 사항
농업용수 공급량	- 중간낙수 시기 시 공급량 중단 모의 불가 - 배분관리 용수량 (용수로 배수량) 고려하지 않음 - 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않음
밭 필요수량	- 밭 필요수량 산정 작부시기 입력자료의 한계 - 국외 작물에 대한 필요수량 산정 시 적용할 수 없음
유역 유출량	- TANK 모형의 매개변수 추정식은 1988년에 개발된 것으로, 이후 개선되지 않았음
저수지 수위	실제 현장에서 운영되고 있는 홍수기 제한수위가 고려되지 않음
전처리 및 후처리	- 기상청 제원 입력 불가하여 국외 등 적용의 한계
	- 논 및 밭 필요수량 산정 시 Default된 값을 수정 후 재구동시 수정된 값을 저장하지 못함
	- 오류 발생 시 프로그램이 강제 종료
	- 일별 출력 파일에 단위가 기재되지 않음
	- 출력 자료를 시각적 (그래프 등)으로 확인할 수 없음

3.3. 저수지 수질 해석

저수지 수질 해석을 위한 대표적인 수체모형으로는 WASP, QUAL2E, EFDC 등의

모형이 있다. WASP (Water Quality Analysis Program)은 미국 EPA의 Great Lake Program의 일부로서 Di Toro 등에 의하여 처음 개발된 후, 수차례의 적용을 통한 결과분석을 바탕으로 수정과 보완을 거쳐 온 모형이다. WASP은 크게 유체의 거동을 모의하는 DYNHYD부분과 수질성분의 거동과 상호작용을 모의하는 WASP부분으로 나뉜다. DYNHYD모형은 수질예측모형의 수행을 위한 수리학적 입력자료인 수위, 유속, 유량 등을 제공하는 모형으로 1993년 DYNHYD Ver.5.11로 개발되어 왔으며, 역시 1993년 Ver.5.0으로 개선된 WASP부분은 다시 부영양화, BOD, DO 등의 일반적인 수질항목을 예측하는 EUTRO5모형과 유기화합물, 중금속, 퇴적물 등에 의한 독성오염을 해석하는 TOXI5모형으로 구성되어 있다. 이 모형은 호수, 강, 하구 등을 포함한 여러 가지 수체에 대해 수체의 흐름방향에 대한 1차원 이동 및 일반 또는 독성물질의 거동과 상호반응에 대하여 정상상태 (steady state) 또는 동적상태 (dynamic state)의 모의 발생이 가능하다.

QUAL2E 모형은 하천수질예측에 중요한 유체이동과 오염물질 확산을 1차원적으로 해석하고 있으며, 많은 점오염원과 비점오염원, 하천의 지류 및 용수취수 등을 다양하게 정상상태 (steady state)로 모의할 수 있다. 모의대상 수질항목은 DO, BOD, Temperature, Chlorophyll-Algae, Organic-N, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, Organic-P, Dissolved-P, Coliform, 3개의 보존성물질, 1개의 비보존성 물질 등 15개이며, 필요에 따라 수질항목을 선택하여 모의 발생할 수 있다.

EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델은 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되어 현재는 US EPA와 Tetra Tech, Inc.에 의해 개발·관리되고 있는 3차원 유동모델이며, 수질 모델, 부유사 이동 및 독성물질 모델과 연결된 통합 버전의 모델로도 사용되고 있다 (박재충 등, 2010). 해양모델로부터 발달해 온 대표적 3차원 모델인 EFDC는 개발 당시부터 소스코드와 사용설명서를 모든 연구자들에게 공개해 왔으며, 미국 환경부는 모델의 발전을 위하여 격자구성, 실행 그리고 결과의 표현 등을 위한 GUI (Graphic User Interface)를 개발하고 있어, 지속적인 발전이 예상된다 (김선주 등, 2011).

적은 양의 입력자료로 저수지의 수질을 간단하게 모의할 수 있는 모형으로는 대표적으로 BATHTUB 모형과 EUTROMOD 모형이 있다. BATHTUB 모형은 수체의 부영양화상태를 영양물질수지 (nutrient mass balance)와 조류의 반응을 설명하는 방정식을 이용하여 유입된 영양물질에 대한 수체수질의 반응을 예측한다 (Walker, 1996). 이 모형은 정상상태모형으로 유입량과 유출량의 차이의 변화가 작은 경우에 보다 정확한 모의결과를 제공할 수 있으며, 수체내에서 발생하는 영양물질 순환의 동역학적 과정을 구체적으로 묘사하기 보다는 수체수질상태의 전체적인 평균적인 값을 예측하기 위해 개발되었다. BATHTUB 는 수체로 유입되는 지류의 수량과 수질 (영양물질) 및 수체의 특징 등의 입력자료로 토대로 수체의 영양물질농도를 추정하고, 이를 엽록소 (chlorophyll a)의 농도 및 탁도 (turbidity)와 관련지어 수체의 부영양화 상태를 예측한다.

EUTROMOD 모형은 수체 배수면적으로부터 유입되는 영양물질 부하량을 계산하고 수체에 존재하는 영양물질의 양과 농도를 계산한 다음 수체의 부영양화 정도를 판단하기 위해 개발된 모형이다 (Reckhow et al., 1992). EUTROMOD에서 수체내의 영양

물질 변화는 물질수지방정식과 일차반응식 (first-order reaction equation)을 이용하여 묘사된다.

국내에서 개발된 모델로는 함중화 등 (2012)이 농업용 저수지 수질관리를 목적으로 적은 입력자료로 짧은 시간 내에 농업용 저수지 수질을 모의할 수 있는 저수지 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)이 있다. ARSIM-rev는 농업용 저수지로 유입된 물질은 저수지 전체에 대해 균일한 농도로 분포한다고 가정하여 단순-완전혼합모델 (0차원 모델)형태로 개발되었다. 또한, 동물성 플랑크톤 이상의 상위 생물상에 대한 영향은 모델에 고려하지 않았으며, 물질의 물리, 화학, 생물학적 변화는 대부분의 모델에서와 같이 1차 반응으로 해석하였다. 또한 반응식에서 미분식을 계산하기 위해 Euler방법에 비해 상대적으로 정확한 값을 얻을 수 있는 Runge Kutta 4차 방법을 사용하여 Visual BASIC 6.0으로 개발되었다. 함중화 등 (2012)은 ARSIM-rev와 기존모델인 CE-QUAL-W2, WASP을 만수저수지에 적용한 결과 전체적으로 적은 수의 유입하천 유량 및 수질자료를 사용하여 모델을 적용한 경우에는 기존모델과 비슷한 정도의 모의결과를 얻을 수 있다고 제시하였다.

우리나라 농업용 저수지는 수문 및 수질 측정 자료가 미비한 것이 현실이다. 따라서 ARSIM-rev, BATHTUB 및 EUTROMOD 모형 등이 비교적 간단한 입력자료를 이용해 저수지 수질을 모의할 수 있고, 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용 또한 용이할 것으로 사료된다.

4. 저수지 하류유역 물순환 해석

4.1. 관개지구 배수량 해석

관개지구를 구성하는 논과 시설재배지는 수문 기작이 상이하다. 논 포장은 관개량과 유효우량이 담수심을 보충하고, 물꼬 높이를 초과하는 포장 배수량이 배수로로 통해 흘러나간다. 또한, 농업용수 공급량 중 일부는 관개되지 않고 용수로의 말단에서 하천으로 배수된다. 시설재배지는 불투수면을 형성하여 강우가 지하로 스며들지 못하고 배수로 또는 하천을 통해 유출된다.

CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980)는 미국 농무성 토양보전국에서 개발한 모형으로 유출량, 토양 유실량 및 영양물질 부하량 등을 일별로 모의하는 포장단위 모형이다. GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) (Leonard et al., 1987)는 CREAMS를 보완하여 농약 등에 의한 지하수 오염을 모의하도록 개발한 모형이다. AGNPS (AGricultural Non-Point Source pollution model) (Young et al., 1987)은 유역단위 모형으로 비점오염원의 발생원 파악과 저감을 위한 최적관리기법을 적용하기 위한 목적으로 개발된 단일 폭우사상, 분포형 모형이다.

하지만 미국에서 개발된 모형은 주로 밭 작물 재배 지역의 유출량 및 비점오염부하를 추정하기 위한 것으로, 우리나라와 같이 논 담수재배 지역에 적용하기에는 한계가 있다.

진영민 (1998)과 서춘석 (2001)에 의해 개발된 CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems for PADDY)는 포장단

위 농업비점오염 모형으로 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하고 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식으로 수정한 모형이다. CREAMS-PADDY 모형에서 논 포장 배수량은 일별 물수지식으로 계산한 일별 담수심과 물꼬 높이의 차가 당일에 전량 배수되는 방식으로 모의한다. 그러나 이 방식은 물꼬의 폭이 고려되지 않아, 물꼬의 폭이 작을 경우 2~3일에 걸쳐 유출이 지연될 수 있는 현상을 고려하지 않고 있다.

Odhiambo and Murty (1996)는 논 물수지 성분인 배수량, 침투량을 물리적 수식으로 표현하여 모형을 개발하였다. 이 모형에서 포장 배수량은 광정위어 공식으로, 침투량은 Darcy의 법칙으로 모의한다. Odhiambo and Murty의 연구를 확장하여 Kim et al. (2009)는 토양수분을 고려하여 광역 논 관개회귀수량을 모의하였으며, Chein and Fang (2012)는 상류 논 관개회귀수량이 하류 논 관개용수로 반복 이용되는 비율을 추정하였다.

Zulu et al. (1996)은 농업유역을 논, 밭, 기타 토지이용으로 구분하여 토지이용별로 Tank 모형을 구성하여 농업유역의 배수량을 모의하는 모형을 개발하였으며, 농업용수의 반복이용이 농업유역의 수문 및 수질에 미치는 영향을 분석하였다.

임상준 (2000)은 농업유역을 배후 유역과 관개지구로 모식화하여 유역 유출량 모형, 관개회귀수량 모형을 구성하였고, 유역의 출구에서 일 유출량, 신속회귀수량, 지연 회귀수량으로 구분하여 논 관개회귀수량을 일별로 추정하는 REFLOW (irrigation RETURN FLOW model)을 개발하였으며, 경기도 화성군 팔탄면과 봉담읍 일대의 발안 지구와 기천지구에 적용하고 평가하였으며, 농업용수 회귀율을 추정하였다.

박기욱 (2004)는 물관리자동화시스템의 효율적인 운영을 위하여 관개조직의 거동을 모의하고 관리자의 의사결정 과정에 필요한 정보를 제공하는 관개조직운영모형인 SIMA (Simulation model for irrigation water MANAGEMENT)를 개발하였고, 모니터링 자료를 이용하여 모형의 적용성을 검토하였다.

Kim et al. (2005)은 하천 관개를 하는 논 지구에서 농업용수 공급량과 용수로 배수량을 모니터링 하였다. 용수로 배수량은 농업용수 공급량의 11~49%의 범위를 보인다고 하였으며, 강우량이 적은 해는 농민들이 농업용수를 최대 사용하려는 경향이 있어 용수로 배수량이 줄어드는 것으로 보고하였다.

이용직 등(2008)은 시설관리 손실량이 농업용수 공급량 중 차지하는 비율을 정량적으로 산정하기 위해서 수로의 종류, 규모, 유형별로 현장 조사를 실시하였다. 송수 손실률은 콘크리트 수로에서 평균 5.7%, 토공수로의 간선은 11.7%, 지선은 20.1%로 보고하였으며, 용수로 배수량은 농업용수 공급량의 31~37%를 차지하는 것으로 보고하였다.

시설재배지의 유출량에 대한 우리나라의 조사 연구는 아직 미비한 실정이다. 김학관 (2009)은 경지 및 불투수면 변화에 따른 유역의 수문 및 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 SWAT 모형을 기반으로 하여 시설재배지 유출량 및 도시합류식 하수관거 월류수를 모의할 수 있는 모형을 구축하였다. 시설재배지의 유출량은 NRCS 유출곡선법 (USDA NRCS, 2004)을 이용하여 모의하며 시설재배지의 CN을 98로 고정하였다.

이남호 (1988)는 관개지구의 물관리 조직을 효율적으로 운영할 수 있도록 관개조직

모의조작모형인 DINOPS (Daily Irrigation Network OPERATION Simulation model)을 개발하였다. 이를 반월저수지 관개지구에 적용하여 물꼬높이와 급수율의 변화에 따른 유효수량과 관개효율을 평가하였다.

4.2. 관개회귀수량 조사 및 해석

수리시설물에서 공급된 농업용수는 전량 작물에 의해 소비되는 것이 아니며, 포장으로 공급되지 않고 용수로를 통해 배수되기도 한다. 포장으로 공급된 수량은 물꼬를 넘어 배수되기도 하고, 일부는 침투되어 지하수를 통해 흘러나가기도 한다. 이와 같이, 농업용수 공급량 중 소모되지 않고 하천으로 유입되는 수량을 관개회귀수량(irrigation return flow)이라 한다 (임상준과 박승우, 2006; Dewandel et al., 2008; 송정현 등, 2013a).

관개회귀수량은 농업구역의 하천 유량을 구성하는 중요한 성분으로 취수시설의 설계와 관개조직의 운영, 용수수급계획, 하천 유향의 예측, 환경용수 방류량의 결정, 그리고 농업비점오염원 관리 등 유역 수자원관리에 있어 중요한 요소로 작용한다 (임상준, 2000; Causape et al., 2006; Lin and Garcia, 2012; Poch-massegu et al., 2014). 하지만, 관개회귀수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이, 담수심 관리 방식 등 인위적 요소의 영향을 동시에 받기 때문에 그 기작이 복잡한 특징을 가진다 (Gosain et al., 2005; 송정현, 2013; Masashi et al., 2014).

우리나라의 수자원장기종합계획에서는 농업용수 공급량의 약 35%가 하천으로 회귀되는 것으로 예상하고 있다 (국토해양부, 2011). 하지만, 선행연구의 조사 결과에 의하면 농업용수 회귀율은 용수 공급 현황과 물관리 방식에 따라 약 32~86%의 범위로 지역별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (임상준, 2000; 추태호, 2004a; 정상옥과 박기중, 2004; 김태철 등, 2010). 따라서, 합리적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 지역별 농업용수 공급 현황과 물관리 방식이 반영된 농업용수 회귀율이 물이용 계 관개회귀수량 조사에 관한 연구는 효율적인 수자원 이용의 측면에서 국내외에서 이루어져왔다. 국내에서는 관개량, 침투량, 그리고 배수량 성분의 관측 자료를 이용하여 관개회귀수량 및 회귀율을 산정하는 연구가 추태호 (2004a), 정상옥과 박기중 (2004), 그리고 김태철 등 (2010)에 의해 수행된 바 있다. 하지만, 이들 연구는 무강우시 물수지 분석을 통한 연구로 강우시 관개회귀수량에 대해서는 고려하지 않았다. 강우시 관개회귀수량 성분을 산정하기 위해서는 배수량 성분 중에서 강우에 의한 유출량 성분을 제외해야하기 때문에 배수량의 단순한 측정을 통해서 분석이 어려운 점이 있다. 그러므로 관개회귀수량 구성요소를 추정하기 위해서는 모니터링을 통한 물수지 요소의 관측과 배수량 모형을 이용한 수학적 모델링을 병행하여야 한다 (임상준, 2000; Kim et al., 2009; Chien and Fang, 2012; 송정현 등, 2013a). 특히, 수량이 풍부하여 용수 공급이 용이한 지역의 경우 영농기 농업용수 공급량이 2,000~3,700 mm으로 크게 관측되고 있으며 (오승영 등, 2002; 송정현 등, 2013b), 이들 지역에서의 관개회귀수량은 다른 지역에 비해 그 수량이 더 클 것으로 사료된다. 또한, 저수지 관개지구 중 넓은 면적에 대해 관개가 이루어지는 지역의 경우 관개회귀수량은 유역 말단의 하천 유량 성분의 큰 비중을 차지할 것으로 사료되며, 이에 관한 연구가 필요하다.

4.3. 비관개지구의 물순환 해석

하천의 유량을 추정하는 방법에는 수문학적 방법과 수리학적 방법이 있다. 수문학적 방법은 자연하천유역의 출구에서 유역의 유출량의 시간적 변화를 추정하는 유역추적법과 저류방정식을 사용하여 임의의 구간으로 유입되는 유량을 가감하여 유량변화를 추정하는 하도추적법이 있으며 하천유량의 장기적인 추정에 주로 사용된다. 수리학적 방법은 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용하여 홍수의 하류전파를 추적하거나 배수영향이 심하고 변동성이 큰 하천구간과 역류부를 가지는 하천의 유량 분석 등과 같은 단기적인 하천유량 추정에 주로 사용된다. 장기유출해석을 위한 하천망 모형은 임의 구간의 유량변화를 장기적으로 추정해야하므로 수문학적 하천망 모형이 필요하다 (강민구, 2004).

허유만 (1992)은 중소하천의 하천망에 의한 유입량과 수요량을 추정하여 구간별 유출해석이 가능하도록 하천망 모형을 구성하여 미계측 중소유역의 일별 용수수급해석 모형 (Daily Water Supply and Demand Model: DSD)을 개발하였다. DSD 모형에서 유역유출계산은 중소유역의 유출지체시간이 짧고 기저유출부분의 기울기가 급하다는 점을 고려하여 Sugawara (1995)의 4단 Tank 모형을 수정한 3단 Tank 모형을 사용하였으며, 구간별 유출량은 물수지 방정식을 사용하여 합성하였다.

김현영 등 (1998)은 수계간이나 지역간 또는 유역간에 산재하는 단순 및 다중시설물 (저수지, 취입보, 양수장 등)의 동시 다발적인 운영조작 등에 대한 유출해석이 가능한 WWASS (Watershed Water balance And Streamflow Simulation)을 개발하여 새만금호의 만경강·동진강유역의 실측자료를 이용하여 적용성을 검증하였다.

Lee et al. (2012a)는 한강 유역을 24개 소유역으로 분할 후 SSARR 모형을 이용하여 유출량을 모의하였고, 고수위와 저수위에서의 모의 결과를 평가하였으며, Lee et al. (2012b)는 농업용 수리시설물의 영향을 고려한 SSARR 모형을 구성하여 하천유량을 모의하였다.

Kang and Park (2014)는 농업용 저수지의 운용과 관개회귀수량을 고려하여 농촌유역의 물 흐름을 모의하였으며, 저수지 유입량은 SSARR 모형을 이용하여 모의하였고, 저수지 물수지식 및 논 물수지식을 고려하였다. 모형의 보정은 SCE-UA 알고리즘을 이용하였다.

4.4. 논에서의 수문 및 수질 해석

농업비점오염원은 강우로 인해 지표유출수를 통해 배출되거나 물 및 시비 관리, 토양 관리 등의 영농방법에 따라 배출양상이 다양하며, 점오염원과는 달리 광범위한 지역을 통해 배출되기 때문에 오염물질의 수집 및 처리에 어려운 특징이 있다 (김민경 등, 2005; 강문성, 2010). 이 중 질소 (N)와 인 (P)은 점오염원에 비해 저농도이지만 배출되는 수량이 막대하여 유역의 오염부하량에 큰 비중을 차지하고 있으며, 하천이나 호소의 부영양화에 큰 영향을 미치는 것으로 보고 되고 있다 (윤광식, 2002; Yoshinaga et al., 2007; 강문성, 2010; 송정현 등, 2013b).

비점오염의 주원인은 강수에 의한 유출이기 때문에 배출부하량은 강우량에 따라 변

동이 크다. 따라서 배출부하량을 정량적으로 평가하기 위해서는 강우량의 변동에 따른 영향을 장기적으로 고려해야 한다 (송정현 등, 2012).

특히, 논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 배출 양상이 다양하며, 농경지내 발생원에 따라 민감도가 큰 것으로 보고되고 있다. 따라서 최근에는 논 비점오염원 저감 방안으로 시비 효율 향상, 효율적인 물관리 등 다양한 영농방법 개선기법이 요구 되고 있다 (강문성, 2010).

논 비점 배출부하량을 정량적으로 산정하기 위해서는 장기적인 모니터링이 가장 정확하다. 국내외에서 오염부하량 정량화에 관한 연구는 최근까지 활발히 진행하고 있으며, 국내외 배수량 및 T-N/T-P 배출부하량 모니터링 결과를 <표 2-9>에 정리하였다.

하지만 모니터링 기법을 이용하여 논에서의 배출부하량 산정하기 위해서는 시험포장을 운영하여 장기간의 실측자료가 뒷받침되어야 한다는 어려움이 있다. 따라서 국내외에서 모니터링 방법의 시간적, 경제적 한계를 극복하기 위하여 비점오염모형을 이용한 배출부하량 해석을 시도하고 있다 (송정현 등, 2012).

포장단위 모형으로 물질순환 기작을 모형화한 CREAMS, GLEAMS 등이 있지만 이들 모형은 밭을 대상으로 개발된 모형으로 논의 담수상태를 고려한 유출 및 영양물질의 거동을 모의하기에는 한계가 있다. 논의 담수상태를 고려하여 수질을 모의하는 모형은 최근들어 국내외에서 개발되고 있다.

국외에서는 Chowdary et al. (2004)에 의해 담수 논과 토양사이의 주요 질소 변환 과정을 질소수지 방정식 기반으로 개발하였으며, Tournebize et al. (2006)은 담수 논과 1 cm 토층을 고려하여 오염물질의 기작을 모의하는 PCPF-SWMS 모형을 개발하였다. Antonopoulos (2010)은 영양물질 기작의 복잡성을 고려하여 물수지 및 질소의 시간적 변화를 준경험식으로 모의하는 모형을 개발하였다.

국내에서는 담수 논에서의 전지홍 등 (2005)이 논에서의 시비와 바닥에서의 용출을 dirac delta function과 continuous source function을 이용하여 배출부하량을 모의하는 PADDIMOD모형을 개발하여 지하수관개논과 지표수 관개논에 대하여 적용성을 평가하였다. 진영민 등 (2002)과 서춘석 등 (2002)은 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하여, 또한 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식을 개선하여 CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems for Paddy) 모형을 개발하여 지표수 관개논에 대하여 적용성을 평가하였고, 성충현 등 (2011)은 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논에서의 수질 변화를 모의하여 배출부하량 저감 효과를 평가한 바 있다. 송정현 등 (2012)은 CREAMS-PADDY 모형과 HOMWRS 모형을 연계하여, 관개량이 CREAMS-PADDY 모형에 입력되는 연계모형을 구축하여 영농기의 배출부하량을 모의하였다.

하지만 국내외에서 개발된 대부분의 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양의 수리학적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 또 다른 제약은 논 비점오염 모형은 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있다 (Viviroli et al., 2009). 따라서 사용자 맞춤형 전·후처리 컴포넌트가 모형에 추가될 필요가 있다.

<표 2-9> 국내외 배수량 및 T-N/T-P 배출부하량 모니터링 결과

출처	기간	배출부하량		배수량 (mm)	비고
		TN (kg/ha)	TP (kg/ha)		
Feng et al., 2004	4-9월	41.7	2.74	1699.0	일본 Yoshinuma 일대 순환관개 논 (2004)
Yoon et al., 2006	5-9월	59.7	1.43	1617.3	펌프관개 남원시 금지면 일대 논 (1999)
Maruyama et al., 2008	4-9월	10.9	1.50	1219.1	일본 Kahokugata 호수 주변 저지대 논 (2003-2006)
Takehide et al., 2011	4-9월	7.7		251.0	일본 Biwa 호수 주변 저지대 순환관개 논 (2004)
	4-9월	3.2		131.0	일본 Biwa 호수 주변 저지대 순환관개 논 (2005)
	4-9월	4.5		293.0	일본 Biwa 호수 주변 저지대 순환관개 논 (2006)
Jang et al., 2012	5-9월	1.58	0.21	214.7	지하수 관개 논 (2007-2009)
	5-9월	7.19	0.72	236.3	하수미처리 관개 논 (2007-2009)
	5-9월	8.54	0.31	229.5	하수 자외선처리 관개 논 (2007-2009)
윤광식 등, 2002	5-9월	57.8	2.33	1,453	남원 양수장 관개 광역 논 (1999)
	5-9월	54.7	1.96	1,421	남원 양수장 관개 광역 논 (2000)
오승영 등, 2002	5-9월	99.3	3.50	4,055	옥산면 하천 관개 광역 논 (1999)
	5-9월	107.4	2.98	3,731	옥산면 하천 관개 광역 논 (2000)
최중대 등, 2003	1-12월	13.4	1.1	591.0	안동시 임동면 포장 논 (2002)
전지홍 등, 2005	5-9월	27.5	1.2	593.2	건대 지하수 관개 논 (2001)
	5-9월	33.2	1.3	1036.2	건대 지하수 관개 논 (2002)
	5-9월	39.7	0.8	602.0	진안군 지표수 관개 논 (1999)
	5-9월	19.8	0.7	701.3	진안군 지표수 관개 논 (2000)
김민경 등, 2005	5-9월	24.4	3.6	677.0	이천시 하천 관개논 (2002)
	5-9월	10.0	5.0	640.0	이천시 하천 관개논 (2003)
	5-9월	10.3	2.4	870.0	이천시 하천 관개논 (2004)
정재운 등, 2008	5-9월	16.1	1.2	657.7	함평군 포장 논 (2004)
최진규 등, 2008	6-9월	15.7	0.4	400.0	함평군 포장 논 (2004)
한국현, 2011	5-9월	34.4	1.0	883.5	공주시 곡간지 유역 포장 논 (2005)
최진규 등, 2012	5-9월	15.7	0.4	400.0	우분 퇴비 시용 논 (2011)
송정현 등, 2013	5-9월	44.43	2.92	3015.8	이동저수지 관개 광역 논 (2011)
	5-9월	34.83	4.90	2505.3	이동저수지 관개 광역 논 (2012)
이정범 등, 2014	4-9월	72.7	3.8	2,282	옥산면 하천 관개 광역 논 (2012)

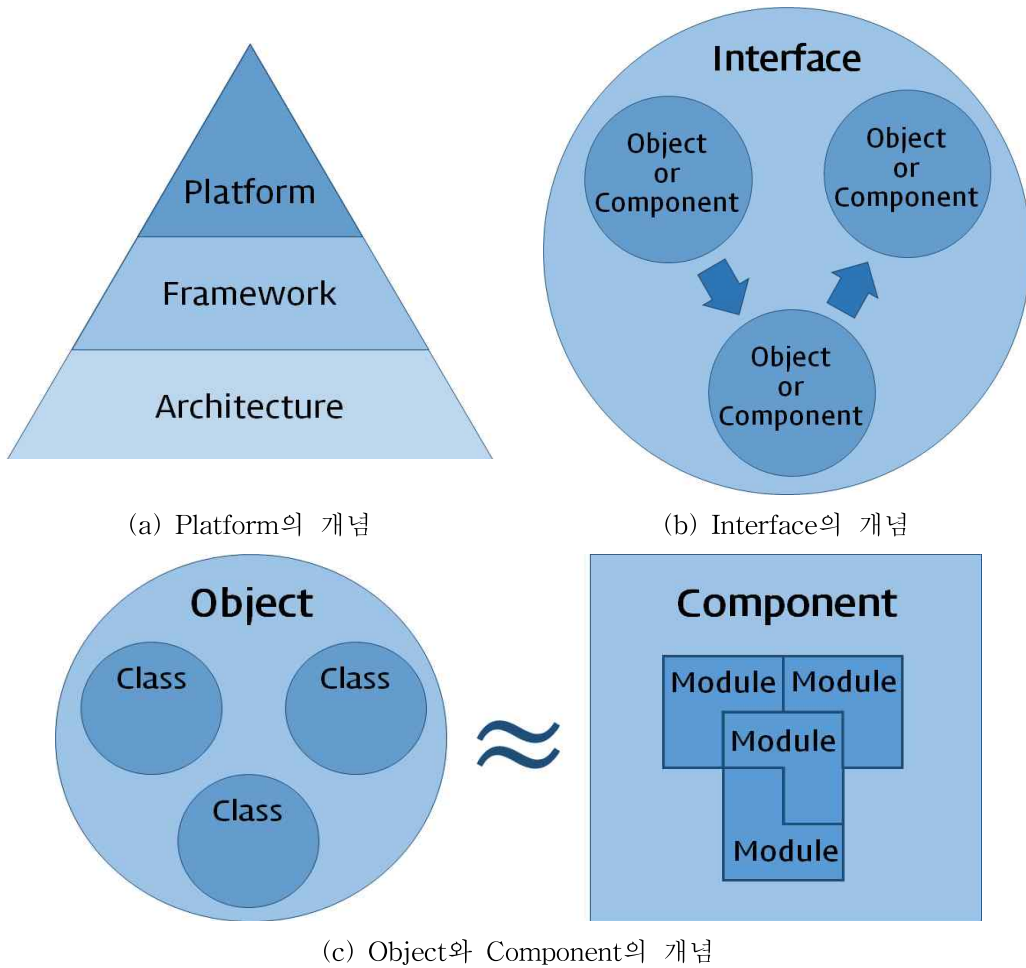
제 4 절 컴포넌트 기반 모델링 Framework 연계 기술

1. 용어 정의

본 연구에서는 농촌용수 물순환 해석 모형을 개발함에 있어 사용한 주요 용어를 <표 2-10>에 개념적으로 정의하였다. 본 연구에서 객체 (Object)와 컴포넌트 (Component)는 유사한 의미로 사용하였으며, 모듈 (module) 역시 플랫폼을 설계하는 부분에서는 객체의 의미로 사용하였다. 아키텍처 (Architecture), 프레임워크 (framework), 플랫폼 (platform)은 명확하게 구분하여 사용하였다. (그림 2-9)는 본 연구에서 사용한 주요 용어의 개념 관계도를 보여주고 있다.

<표 2-10> 농촌용수 물순환 해석 모형의 용어 정의

용어	정의
Object	객체지향 프로그래밍에서 자료와 그 자료에 관련된 동작 (절차, 방법, 기능)을 포함하는 개념이다. 여기서 객체란 단순한 자료가 아니라 자료에 대한 조작 방법도 포함하여, 이러한 객체를 수단으로 사용하는 방법이 객체지향이다. 객체는 클래스를 이용하여 생성할 수 있다.
Class	객체지향 프로그래밍에서 새로운 객체를 생성시키기 위한 하나의 틀로 정의하며 객체의 설계도라 할 수 있다. 클래스를 이용하여 객체를 생성한다.
Component	프로그램의 구성단위 (Module)를 미리 설계한 다음 이 구성단위를 이용하여 필요한 프로그램을 레고블록을 쌓듯이 조립하는 기술을 의미한다. 복잡한 시스템을 신속하게 구축할 수 있으며, 재사용이 가능한 장점이 있다.
Module	프로그램을 기능적으로 분할한 하나의 단위로 재사용이 가능한 특징을 갖는다. 본 연구에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 다양한 모의 요소를 모듈로 정의하였다.
Architecture	소프트웨어의 특징을 결정짓는 설계 구조이다. 소프트웨어의 구성요소, 주요 인터페이스, 주요 동작 방식 등을 종합하기 위한 틀이다. 지원 프로그램, 언어, 라이브러리 등의 구체적인 구현은 포함하지 않는다.
Framework	소프트웨어를 개발할 수 있는 틀을 제공하는 뼈대 구조이다. 지원 프로그램, 언어, 라이브러리를 포함하나 완전한 소프트웨어 실행 환경은 제공하지 못한다.
Platform	소프트웨어가 실행되는 환경이다. 대표적인 예로 OS (Windows, Linux)를 들 수 있다.
Interface	객체, 컴포넌트가 서로 연결되어 상호작용하는 시스템으로 특정한 규격에 의해 정의된다. 본 연구에서는 입력, 연산, 출력의 수단을 사용하여 설계하였다.



(그림 2-9) 농촌용수 물순환 해석 모형의 용어 개념 관계도

2. 컴포넌트 기반 Framework

농촌 유역의 물순환 해석을 위해서는 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회 경제적인 요소 등의 다양한 측면을 포괄하여야 할 것이다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 것을 객체지향 모델링 기법이라 할 수 있다. 즉, 다양한 모의 요소를 하나의 독립적인 객체로 모듈화 하여 다수의 모듈을 조합하여 활용할 수 있도록 하는 개념이다. 이를 통해 특정 문제에 맞게 필요한 모듈을 선정하고 배열하여 맞춤형 모델을 구축하여야 할 것이다.

이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 농촌용수의 용수구역 단위의 종합적인 해석모형의 개발이 필요하다. 농촌용수의 복잡성을 고려하면 모델링 Framework는 다양한 모델 또는 모듈을 통합할 수 있고, 기존의 모델을 수정 하지 않고 모델간 연동이 이루어져야 하며, 따라서 확장성이 뛰어난 객체지향 기반의 Framework를 구성하여야 할 것이다. 국외에서 최근에 개발된 객체기반 Framework는 GF (Generic Framework), OMS (Object Modelling System), ICMS (Integrated Catchment Modelling System), TIME (The Invisible Modelling Environment),

OpenMI (Open Modelling Interface) 등이 있으며, 이들은 지속적인 개발 및 적용이 이루어지고 있다. 최근에 개발된 Framework는 객체를 기반으로 하는 통합 모형이 주를 이루고 있으며, 본 연구에서는 객체 기반의 대표적인 Framework를 선정하여 조사/분석하였다.

Generic Framework (GF)는 모형을 연계하고 의사결정을 지원하기 위한 개방형 Framework로, 주된 기능은 통합유역모델링과 환경모델링과 관련된 모형을 메모리 기반의 하나의 시간 간격 (time-step)으로 연결하고, 모형간의 피드백 루프를 설정하는 것이다.

Object Modeling System (OMS)은 2D/3D에서의 유속 시뮬레이션과 이송과정을 연구하기 위해 개발된 모형 시스템으로 Delft3D 시스템과 Simona 시스템을 통합해서 개발되었다. OMS의 기본 개념은 모든 시스템과 모형 컴포넌트를 독립적인 모듈로 나타내는 것이며 legacy computational cores 사이에 자료 교환과 동기화가 가능하도록 유연한 환경을 제공한다.

Integrated Catchment Modelling System (ICMS)은 시각적인 표현 (graphical representation)을 이용하여 사용자가 유역 모형을 생성, 연결, 실행할 수 있는 기능을 제공한다 (Reed et al., 1999).

TIME (The Invisible Modelling Environment)은 환경 모형을 개발하고 적용하기 위한 공통의 구조를 제공하는 객체로 구성된 Framework이다. 호주 CRC에서 개발하였으며, Microsoft .NET을 사용하여 컴포넌트 기반의 연산을 위한 다언어 플랫폼을 제공하므로 다양한 언어로 개발한 모형 컴포넌트를 빠르게 통합하여 개발할 수 있다.

OpenMI (Open Modelling Interface)는 개방형 표준 인터페이스로 OpenMI와 호환이 가능한 컴포넌트간의 자료를 교환하고 실행할 수 있도록 지원한다. OpenMI는 유럽의 HarmonIT 프로젝트를 통해 14개 기관과 7개 나라가 참여하여 개발되었다. OpenMI는 표준인터페이스를 모형 정의(Model definition), 구성(Configuration), 실행 작업(Run-time operation)으로 정의한다. 모형 정의는 다른 연결 가능한 컴포넌트들이 이 모형에서 교환할 수 있는 용어 및 장소가 무엇인지 알려주는 기능을 포함하고, 구성은 두 개의 모형이 특정한 목적으로 연결되었을 때 무엇을 교환할 것인지를 정의하며, 실행 작업은 모형이 실행하는 동안 자료를 사용하거나 제공하도록 지원한다.

3. 모델링 Framework 연계 기술

농촌용수 관리자, 설계자, 정책 입안자들에게 있어서 농촌용수의 사후적 평가와 사전적인 예측은 그들의 운영 조작, 규모결정, 타당성 검토 등의 중요한 의사결정에 효과적인 방법론이다. 사후적 평가 (Ex-post evaluation)는 어떤 결정이나 현상이 발생한 후에 이를 평가하는 방법으로 최근의 농업정책 평가 방법론으로 많이 이용되고 있다.

사전적인 평가 (Ex-ante assessment)는 정책적인 결정 혹은 선택의 상황에서 선택 조건에 따른 각각의 잠재적인 영향을 파악하고 모의 (Simulation)하여 그 결과를 사전에 추정하는 방법이다. 이러한 두 가지 방법 중에서 사후적인 평가는 입력조건을 조사한 상태에서 그 결과를 분석하는 것으로 비교적 정확한 분석이 이루어 질 수 있는 반면에, 사전적 평가는 사회구조나 환경문제와 같이 복잡계 시스템 (Complex System)에

서 어떤 선택의 결과가 유발하는 잠재적인 영향을 사전에 파악하는 것으로 모델 및 모델링의 주요한 동기가 된다 (Knapen et al., 2013).

모델 혹은 모델링은 정량적인 시스템으로서 분석 대상이 되는 현실 세계의 일부를 의도적으로 단순화하여 나타낸 것을 의미한다. <표 2-11>은 모델링에 대한 정의 및 구분을 나타내고 있다 (Laniak et al., 2013). 기존의 모델은 경제, 농업, 환경 등 각각의 분야에 대한 프로세스만을 단순화하여 모델링하였기 때문에 서로간의 복합적인 상호영향을 설명하는데 한계가 있다. 최근에 이러한 한계를 극복하기 위한 노력의 일환으로 학제 간 (multi-disciplinary) 연구를 통해 모델을 통합하고 상호간의 영향을 분석하여 전체적인 시스템을 통합 평가 (integrated assesment)하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 통합시스템 구축은 서로 다른 배경의 학문분야에서 개발된 모델 간 연동을 지원해야 하는데 대부분 시간적 (temporal), 공간적 (spatial) 규모 (scale)가 다른 모델 간 연동을 어떻게 효과적으로 지원할 수 있는가에 대해 많은 연구가 진행되고 있다.

<표 2-11> 모델링의 정의 및 구분

Modeling Type	Description
Conventional Modeling	A process of creating a simplified representation of reality to understand it and potentially predict and control its future development. Models are generally single purpose (i.e., represent a single modeling discipline) and can come in a variety of forms and implementations, including mental, verbal, graphical, mathematical, logical, physical, etc.
Integrated Modeling	Integrating modeling includes a set of interdependent science-based components (models, data, and assessment methods) that together form the basis for constructing an appropriate modeling system.
Integrated Assessment	Integrated assesment seeks to provide relevant information within a decision making context that brings together a broader set of areas, methods, styles of study, or degrees of certainty, than would typically characterize a study of the same issue within the bounds of a single research discipline
Integrated Assessment Modeling	Integrated assesment modeling is an analytical approach that brings together knowledge from a variety of disciplinary sources to describe the cause effect relationships by studying the relevant interactions and cross-linkages
Integrated Decision Making	Integrated decision making is an approach for evaluating complex problems holistically by integrating resources and analyses to address the problems as they occur in the real-world; including input from appropriate stakeholder.
Participatory Modeling	Participatory modeling is a generic term used for modeling strategies that rely upon stakeholder involvement and participation in various forms. In various applications also known as group model building, mediated modeling, companion modeling, shared vision planning, participatory simulation, etc.

효과적인 모델 간 연동을 지원하기 위해서는 의미론적 통합 (semantic integration),

방법론적 통합 (methodological integration), 기술적 통합 (technical integration)이 뒷받침 되어야 한다 (Schopfer et al., 2004).

- ① 의미론적 통합: 통합의 대상이 되는 각 분야의 모델과 모델러 간의 공통된 언어와 공통된 문제의식, 공통된 기술언어 (UML, Flow-Chart 등)를 구축하는 것을 의미한다.
- ② 방법론적 통합: 모델과 모델간의 연동을 위해서 하나의 모델에서 추출된 결과가 다음 모델에서 이용될 수 있는 형태로 변형하는 과정을 정의하는 것으로, 대부분 시간차원과 공간차원에 대한 데이터의 통합이 요구된다.
- ③ 기술적 통합: 통합모델을 운용하는데 있어서 사람의 개입 없이 모델 간 데이터의 연동 및 교환이 이루어지도록 하는 부분으로 시뮬레이션 툴 개발 및 피드백 구조의 정의가 여기에 해당된다.

모델링 프레임워크 (Modeling Framework)는 모델 간 연동에 있어서 방법론적 통합과 기술적 통합의 효과적으로 지원할 수 있는 구조를 제공한다. <표 2-12>은 최근의 모델링 프레임워크에 대한 종류 및 장·단점을 비교한 것이다.

Complexity는 해당 프레임워크에 대상 모델을 적용하기 위해 모델이 지원해야 하는 구축조건을 나타내는 것이다. Standard functionality은 프레임워크 자체에서 모델의 통합, 계산, 분석, 그래픽환경 등의 지원여부를 판별하는 것이다. Impact on model은 프레임워크와 모델간의 통합을 위한 코드 수정 정도를 나타낸다. Open development는 소스의 공개여부, 프레임워크의 라이선스 상태에 대한 것을 나타낸다. Technical/semantic은 프레임워크의 제공 기능이 기술적인 통합을 제공하는 것인지 아니면 추상적인 개념에서 의미론적 통합까지 포함하는지에 대한 것이다.

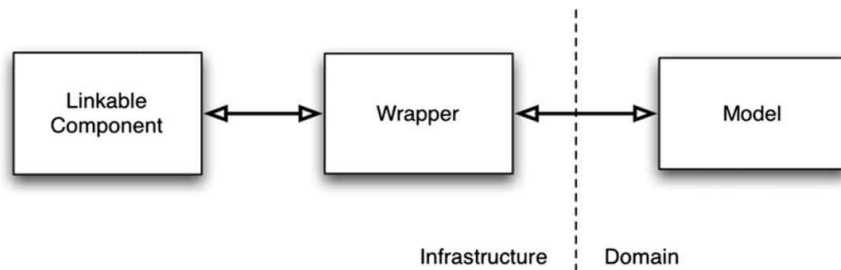
<표 2-12> 모델 Frameworks의 특징 (Knapen, 2013)

Framework	Complexity	Standard functionality	Impact on model	Open development	Technical /Semantic
Object Modelling System	Low	High	Low	Yes	Technical
TIME	Low	High	Low	No	Technical
OpenMI	Medium	Low	Medium	Yes	Technical
Common Modelling Protocol	Medium	Low	High	Partly	Technical
MODCOM	Medium	High	High	Partly	Technical
FRAMES	High	High	Very High	No	Technical / Semantic
Kepler	High	High	High	Yes	Technical / Semantic

이상의 프레임워크 각 요소에 대한 평가를 검토해 볼 때, TIME 및 Object Modelling System이 가장 좋은 프레임워크 구성을 보이고 있지만, TIME은 공개프로그램 형태가 아니므로 프레임워크에서 제공하지 않는 기능에 대한 확장성이 부족하고, Object Modelling System은 공간 및 시간차원에서 데이터의 연동 기능이 명확하지 않아 학제 간 통합모델을 구성하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 기능 비교를 통해 OpenMI를 기본 프레임워크로 선정하였다.

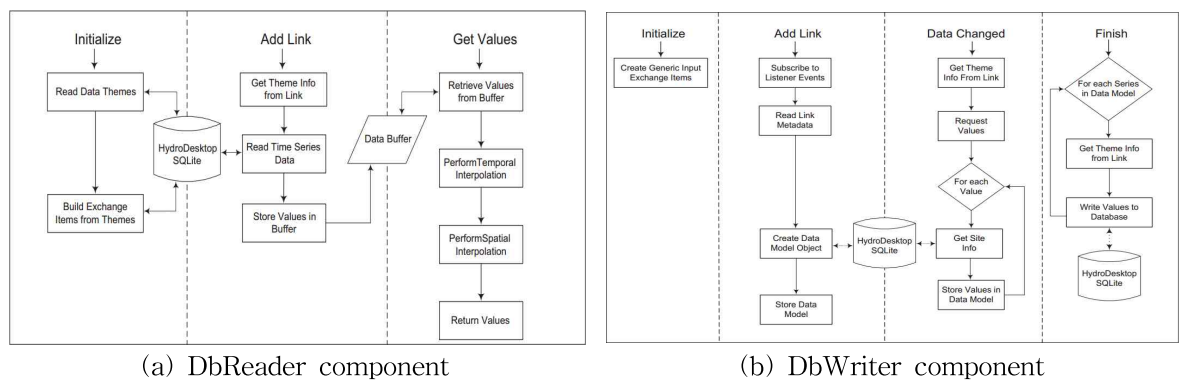
OpenMI (Open Modeling Interface, <http://www.openmi.org>)는 2002년 통합수문유역 관리 (Integrated hydrological catchments management) 시스템 개발에 필요한 요구조건을 만족하는 프레임워크를 구축하기 위해 개발되었다. OpenMI는 필요한 기능을 인터페이스 (Interface)를 정의하는 형태로 구성되어 있으며, OpenMI 그룹에서 이에 대한 표준 인터페이스 플랫폼을 지원하고 있다.

Knapen et al. (2013)은 다 학제간의 모형을 통합하는 플랫폼을 개발하는데 있어 OpenMI의 적용성을 평가한 바 있다. OpenMI는 기존의 모델을 통합하는데 있어서 기존 모델을 수정하기 않고 입력 조건 및 결과를 Wrapper로 처리하여 하나의 모델에서 출력된 결과를 다른 모델에서 이용될 수 있는 형태로 변환하도록 하여 모델 간 통합을 지원하고 있다 (그림 2-10).



(그림 2-10) Wrapper를 이용한 모형 간 연계

Castronova et al. (2013)은 OpenMI를 기반으로 하여 수문 자료 관리와 도시화를 중점으로 하는 CUAHSI HIS 모형과 통합하는 소프트웨어를 제시하여 자료와 시스템간의 상호운용성을 나타내었다. (그림 2-11)은 수문 자료를 읽고 쓰기 위해 설계한 컴포넌트를 나타내고 있다.



(그림 2-11) OpenMI를 이용한 컴포넌트 설계

농촌용수 물순환 종합해석을 위해서는 관련된 다양한 모델의 통합을 지원하는 프레임워크로서 다음 조건을 만족해야 한다.

- ① 수리모형, 수문모형, 물관리 모형, 지하수 모형, 용수량 산정 모형, 생태모형, 수질관리 모형, 지하수 모형 등 다양한 모델의 통합을 지원해야 한다.
- ② 모델 간 서로 다른 차원의 데이터 이용을 지원하기 위해 데이터 차원 변형 기능을 지원해야 한다.
- ③ 모델 간 서로 다른 시간에 대한 데이터를 처리할 수 있는 기능을 제공해야 한다.
- ④ 모델 간 서로 다른 스케일 (관개지역, 소유역, 중유역, 대유역 등) 사용에 따른 데이터의 변환 기능을 지원해야 한다.
- ⑤ 데이터베이스, 파일, API, SOAP 등 다양한 외부 인터페이스를 지원해야 한다.
- ⑥ 기존 모델을 프레임워크에 반영하기 위해 새로 개발하거나 많은 소스 수정 없이 다른 모델과의 연결을 지원할 수 있어야 한다.
- ⑦ 다양한 OS 상에서 운영될 수 있어야 한다.
- ⑧ 다양한 언어로 구현할 수 있어야 하며, 기존 모델을 통합할 경우 기존 모델간의 언어 (Program Language)가 동일하지 않아도 통합할 수 있어야 한다.
- ⑨ 관리자의 개입 없이 시뮬레이션 구성이 가능해야 하고, 각각의 프로세스에 대한 모니터링이 지원되어야 한다.

제 5 절 국내외 기술개발현황 요약

본 장에서는 다양한 지역적 조건을 반영할 수 있는 농촌용수 물순환 해석 모형 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework를 구축하기 위한 이론적 배경으로, ① 농촌용수 물순환 과정 및 모의요소를 정립하였고, ② 정립된 모의 요소와 관련된 국내외 물순환 해석 모형 및 요소기술의 개발 현황을 조사하였고, ③ 컴포넌트 기반 모델링 Framework 연계 기술을 조사하여 본 연구의 이론적 배경을 제시하였다. 본 장의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 농업유역을 저수지 상류유역, 농업용 저수지, 저수지 유역으로 구분하였다. 저수지 상류유역의 모의요소로는 유역 유출량, 유역 증발산량, 지하 침투량, 그리고 상류 배출부하량을 선정하였다. 저수지 하류 유역의 모의요소로는 증발산량, 유효우량, 필요수량, 송수 손실량, 용수로 배수량, 논 포장 배수량, 시설재배지 유출량, 비관개지구 유출량, 지하수 유출량, 논 비점 배출부하량, 그리고 하류 배출부하량 등을 선정하였다. 농업용 저수지의 모의 요소로는 농업용수 공급량, 만수위 방류량, 제한수위 방류량, 환경용수 공급량, 저수지 수위, 그리고 저수지 수질 등을 선정하였다.
- ② 수문 모형을 적용 대상지역, 수문사상, 공간적 범위 (유역, 포장, 지점), 물리적 관계의 분석 유무 (결정론적, 비결정론적), 매개변수의 공간적 변화 고려 유무 (집중

형, 분포형)에 따라 구분하였으며, 수문 모형의 개발현황을 미국에서 개발된 수문 모형을 중심으로 1970년대에서 현재까지를 5단계로 구분하여 분석하였다.

- ③ 장기유출량 모형으로 SWM-IV, SSARR, NWSRFS, Tank, SHE, MIKE SHE WM, MIKE11, TOPMODEL, SFB, Xinanjiang, PRMS, MODHYDROLOG, ARNO, HBV-96, 그리고 SWAT 등을 조사하였다.
- ④ 농업용 저수지 상류유역 수질해석 기법을 조사하였으며, LOADEST 기반 오염부하량 회귀식 방법과 원단위법의 적용성을 검토하였다.
- ⑤ 국내외의 저수지 물수지 및 운영규칙에 대해 조사하였으며, 그 결과 우리나라 저수지는 농업용수 공급이라는 단일 목적으로 운영되었으나, 최근 홍수조절이라는 목적이 추가되는 점을 고려할 필요가 있고, 기존의 DIROM/HOMWRS./기타선행 연구에서 적용하는 과거 규칙에서 현재 여건을 고려한 새로운 운영 규칙으로 대체할 필요성이 있음이 드러났다.
- ⑥ 저수지 물수지 모의 관련 매개변수 중 관개효율은 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이 모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있기 때문에 연단위로 변화도록 구성하는 것이 한 방안일 수 있다.
- ⑦ 저수지 수질 해석 기법 조사 결과, ARSIM-rev, BATHTUB, EUTROMOD 등은 비교적 간단한 입력자료와 모의기법으로 저수지 수질을 모의할 수 있음을 확인하였고, 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용 또한 용이할 것으로 예상된다.
- ⑧ 관개지구 물순환 해석 관련 국내외 선형연구를 조사하였으며 관개지구는 논과 시설재배지로 구성되며, 관개지구의 배수량은 강우에의 의한 유출량뿐만 아니라 관개 회귀수량 또한 크게 영향을 미치기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.
- ⑨ 저수지 하류의 하천유량은 저수지 방류량/관개지구 배수량/비관개지구 유출량 등이 복합적으로 영향을 미치며 임의 하천 구간의 유량변화를 장기적으로 추정하기 위해서는 수문학적 하천 네트워크 모형의 구축이 필요하다.
- ⑩ 국내외 논 비점 오염 관련 선형연구를 조사하였으며, 선형연구의 모형은 대부분 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양 수리학적 특성, 질소 및 인 순환과 관련 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 또 다른 제약은 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있었고, 이에 대한 개선이 필요하다.
- ⑪ 농촌용수 물순환 해석 모형을 개발하는데 있어 사용하는 주요 용어의 개념적 정의를 정립하고 각 용어간의 관계를 도식화하였다.
- ⑫ 농촌용수의 복잡성을 고려하면 모델링 Framework는 다양한 모델 또는 모듈을 통합할 수 있고, 기존의 모델을 수정 하지 않고 모델간 연동이 이루어져야 하며, 국외에서는 최근에 개발된 객체기반 Framework은 GF (Generic Framework), OMS (Object Modelling System), ICMS (Integrated Catchment Modelling System), TIME (The Invisible Modelling Environment), OpenMI (Open Modelling Interface) 등이 있으며, 이들은 지속적인 개발 및 적용이 이루어지고 있다. 이중 OpenMI는 소스 공개, 레거시 모형 (Legacy Model or Program)의 통

합, 데이터의 확장성 등을 가장 잘 지원하기 Framework로, 모형을 통합하는데 있어서 기존 모형을 수정하지 않고 Wrapper를 이용하여 입력 및 결과 자료를 모형 간에 자유롭게 사용할 수 있는 환경을 제공하여 모형 간 통합을 지원할 수 있는 특징이 있다.

이상과 같이 최근까지 국내외에서 수리·수문 해석과 관련하여 연구가 이루어져 왔으나 국외에서 개발된 수문, 수리, 수질 모형은 기상, 토양, 작물, 지형, 기후, 토지 이용 등 지역적 조건이 상이한 환경에서 개발되었기 때문에 적용에 한계가 있는 실정이다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 농촌용수의 용수구역 단위의 종합적인 해석모형의 개발이 필요하다. 농촌용수의 복잡성을 고려하면 모델링 Framework는 다양한 모델 또는 모듈을 통합할 수 있고, 기존의 모델을 수정하지 않고 모델간 연동이 이루어져야 하며, 따라서 확장성이 뛰어난 객체지향 기반의 Framework를 구성하여야 할 것이다. 본 연구의 분석 결과는 농촌용수 물순환 해석 모형의 모의 요소 기법 및 모델링 Framework선정을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이다.

제 6 절 연구결과가 국내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

국내외 기술개발현황을 조사한 결과, 물순환 해석모형의 정확도를 증가시키기 위해서는 여러 가지 물리적인 기작이나 고차원적 요소를 고려하는 것이 필요하지만 이는 모형의 복잡성을 증가시키고 모형의 안정성을 저하시킬 수 있음이 나타났다. 따라서 모의 기법을 선정하는 경우 모형의 복잡성·정확성뿐만 아니라 사용의 편의성을 고려하여 상호간 균형이 잘 이루어지도록 적용 기법을 선정하거나 개발하는 것이 필요하다.

한편, 농촌유역은 지역적으로 기상·토양·작물·지형·토지이용 등의 물리적 특성이 상이하므로, 농촌유역 내의 영농방법 또한 다양하고 복잡하다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다 (송정현 등, 2013). 따라서, 우리나라 농촌유역의 물순환 요소를 모의하기 위해서는 지역적으로 상이한 환경조건과 복잡성 등을 고려하여 능동적으로 모형을 구축할 필요가 있다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나가 바로 객체지향 모델링 시스템이다 (Argent, 2006; Argent et al., 2006). 즉, 이러한 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모형 형태의 객체지향 모델링 시스템 구축이 필요하다.

본 과업의 연구결과가 국내외 기술개발현황에 차지하는 위치는 다음과 같다.

- ① 본 과업에서는 개발하고자 하는 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모

형을 인터페이스를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 개발하였다. 사용자는 COMFARM을 통해 모의 요소와 이용 목적에 따라 기 구축된 모듈 또는 사용자 개발 모듈을 연결하여 사용자 맞춤형 모형을 설계할 수 있으며, 다양한 농촌용수 운영 시나리오를 적용할 수 있다. COMFARM은 유역단위 농촌용수의 체계적·과학적 해석 및 관리가 가능하며, 이를 바탕으로 농촌유역 단위의 미래 농촌용수 예측은 물론 중장기 농촌용수 활용계획을 위한 정책 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

- ② 본 과업에서는 미계측 저수지 상류 유역의 유출량을 추정하기 위하여 개념적 강우-유출 모형인 Tank 모형의 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 총 3 Case의 회귀식 (일반화된 회귀식, Case I의 구간에 대한 회귀식, 및 Case II 구간에 대한 회귀식 등)은 향후 임의의 유역에 대한 장기유출량 모의 시 보다 신뢰성 높은 결과를 나타낼 것으로 기대된다. 또한, 용수공급량, 무효방류량 등의 자료 획득에 어려움이 있는 미계측 저수지유역의 유역관리, 설계 및 운영 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.
- ③ 본 연구에서는 개발된 LOADEST 회귀모형 기반 매개변수 추정방법은 실측자료가 확보되지 않은 농업용 저수지 소유역에 대한 오염부하량 모의와 정책결정을 위한 스크린 모델로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
- ④ 본 연구에서는 개발한 COMFARM 기반 사용자 맞춤형 모형인 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템 ARWS는 현장의 영농 상황을 고려하여 개발되었기 때문에 HOMWRS에 비해 비교적 양호한 모의 결과를 나타내며 향후 농촌유역의 물순환 해석에 적용이 용이할 것으로 기대된다.
- ⑤ 관개효율의 연별 변화와 필요수량을 고려하여 추정된 용수 공급량이 실제 현장에서 공급되는 수량을 잘 모의하는지를 평가하였으며, 연구 결과는 농업용수 공급량의 모의를 위한 전반적인 이해를 도우며, 향후 관개구역 단위의 합리적인 공급량 산정을 위한 실질적인 방법론 및 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
- ⑥ 농업용 저수지 물수지 모형을 농업용수 공급량 모형과 저수지 유입량 모형을 연계하여 개발하였으며, 홍수기 제한수위와 연단위 관개효율 변화를 고려하는 저수지 운영규칙을 개발하였다. 연구 결과는 아시아의 80 %가 관개로 이용되고 있고 그 수량의 50 % 이상이 논 관개용수로 이용되는 현황을 고려하면 본 연구에서 개발된 저수지 물수지 모형과 운영규칙은 한국을 포함한 여러 아시아 국가에서 유용할 것으로 사료된다. 또한, 모형은 기후변화 등 다양한 여건변화를 고려하여 저수지 운영규칙을 재수립하는데 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
- ⑦ 복합영농 관개지구의 배수량을 모의하는 모형을 개발하였으며, 모형은 관개지구의 배수량에 대한 이해를 넓히며, 배수량 추정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.
- ⑧ 관개회귀수량을 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 지연회귀수량으로 구분하여 모니터링과 모델링 기법을 병행하여 산정하였다. 본 연구결과는 향후 합리적이며 경제적인 수자원 이용 및 관리를 위한 물이용 계획에 반영되어야 할 것으로 사료된다.
- ⑧ 본 연구에서는 논에서의 수문 및 수질 모의 시스템을 CREAMS-PADDY 모형을

수정하여 개발하였다. 기존에 개발된 국내외 논에서의 수문 및 수질 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양의 수리학적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없었고, 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있었는데, 본 연구에서는 이를 해결하였다.

- ⑩ 본 연구에서는 최적화 기법을 이용한 수문 모형의 매개변수 보정 방법을 MATLAB 등의 프로그램을 중심으로 소개하였으며, 이는 알고리즘은 공개되어 있으나 관계기관을 통해 프로그램이 출시되지 않은 여러 집중형 모형들의 보정에 널리 이용될 수 있다.
- ⑪ 본 연구에서는 농촌용수종합정보 자료관리 시스템을 개발하였으며, 농촌용수 물순환 해석을 위한 효율적인 자료 관리를 할 수 있을 뿐만 아니라, 추후 수문 및 수질 모형을 모의함에 있어 필요한 자료를 각각 맞춤형으로 구성하여 편의를 제공할 수 있어 모니터링 자료의 다각적인 분석을 할 수 있는 토대를 제공할 수 있을 것이라 사료된다.
- ⑫ 본 연구에서는 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하였으며, 연구 결과는 향후 지능형 물순환 해석 및 관리 기법 개발 및 적용을 위한 확장이 가능할 것으로 사료된다. 또한 기후변화에 대응하여 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 용수구역 단위의 종합적인 농촌유역 물순환 해석에 필요한 자료의 구축 및 전처리와 모형 연계 자료 구축을 제공하는 웹기반 기법 관련 원천기술 확보가 기대된다.
- ⑬ 본 연구에서는 이동지구/동진지구/연구원 시험포장을 대상으로 기상/수문/영농 모니터링을 수행하였다. 본 연구 결과는 농업용수 관리의 기초자료로 사용 가능할 것으로 판단된다. 농촌수자원의 안정적인 용수공급과 효율적인 배분 및 관리를 위한 용수관리의 기초자료로 활용 가능하다고 사료된다. 또한, 구역별 수요 변동에 따른 대응으로 관개조직별 용수공급의 불균형 및 과도한 물의 낭비와 부족을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 기술적으로 기후변화 대응 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석이 가능한 컴포넌트 기반의 종합적 농촌용수 해석 Framework 관련 원천기술 확보가 기대된다. 또한, 한국형 농촌용수 요소 해석 기법 관련 원천기술 수월성 확보를 통한 세계적인 기술력 선점 및 세계 최고수준의 전문인력 양성이 기대된다.

사회/경제적으로는 우리나라 농촌유역 특성 및 기후변화를 고려한 미래 농촌 수자원의 가뭄 및 홍수에 대한 전방위적 대처를 통한 국가 식량 안보 기반 구축 및 삶의 질 향상에 기여할 수 있다. 또한, 농촌용수의 하드웨어 기술 뿐 아니라 이를 종합적으로 해석하고 그 영향을 평가할 수 있는 COMFARM의 개발은 기상, 작물, 토양, 산림, 수문, 수질, 수리시설물 등 농촌용수 관련 주요 요소들에 대한 종합적인 해석이 가능하기 때문에 국내 및 국외에 판매 및 원조를 통한 경제성 측면 및 국제협력 위상 향상이 기대된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용

1. 서 론

저수지 상류유역의 유출량 추정은 저수지와 유역관리에 중요한 요소이다. 가장 정확하게 유출량을 결정하는 방법은 직접 유출량을 측정하는 것이고, 우리나라는 지속적인 투자를 통하여 세계적인 수준의 수문관측 시스템을 갖추게 되었다. 그러나 국내에 산재한 저수지는 2010년을 기준으로 총 17,531개로 모든 저수지에 대하여 고비용의 수문관측시스템을 구축하는 것에는 어려움이 있으며 관측된 수문자료 또한 축적된 정도가 부족하고 실측자료가 일부 존재하는 등 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있어 이를 이용하는 것에 어려움이 존재한다 (Im et al., 2007; 최호훈과 이효상, 2012). 부족한 유출량 자료를 모의하는 방법으로는 경험식에 의한 방법, 비유량법 등 여러 가지가 있으나 강우-유출모형을 이용하여 모의하는 것이 일반적이다 (신현석 등, 2007).

국내의 유역 유출량 추정에는 Tank, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) 등 다양한 모형이 사용되고 있으며, 이 중 Tank 모형과 SWAT 모형이 널리 이용되고 있다 (성영두 등, 2008; 김남원 등, 2009; 김철겸과 김남원, 2012; 강민구 등, 2013).

Tank 모형은 집중형 수문 모형으로 유출과정의 공간적 분포를 유역단위로 평균화하여 계산하며, 우리나라에서는 수정 3단 Tank 모형이 주로 사용되고 있다. Tank 모형은 입력 자료의 구축이 쉽고 상대적으로 매개변수가 적어 보정이 쉽고 처리속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다 (박진혁과 강부식, 2007; 김철겸과 김남원, 2012). Tank 모형에 대한 연구는 모형의 정확도 향상을 위한 매개변수 최적화 및 미계측 유역 적용을 위한 매개변수 지역화 등을 위주로 이루어져 왔다 (김현영과 박승우, 1988; 허유만 등, 1993; 김선주 등, 2000; 김선주 등, 2005; 신상훈 등, 2010; 강민구 등, 2013).

기존의 회귀식 중 김현영과 박승우 (1988)의 회귀식은 미계측 저수지 유역의 유입량을 산정하기 위해 최근까지도 많은 연구자들이 이용하고 있다 (Yoo et al., 2013). 하지만 해당 회귀식은 개발에 이용된 유역 개수가 12개로 비교적 적으며, 매개변수 추정을 위한 유출량 실측 기간 또한 1~2년으로 짧은 한계가 있다. 최근에는 국토교통부 및 한국수자원공사에서 주요 유역에 대한 비교적 장기간의 유량 자료를 보유하고 있으며 이를 이용한 Tank 모형 매개변수 추정 회귀식이 개발될 필요가 있다. 또한, 해당 회귀식 개발에 이용된 보정 매개변수 중 일부 침투 계수, 유출공 계수, 유출공 높이 매개변수는 Sugawara (1972)가 제시한 범위에서 벗어나고 있다. 산정된 매개변수가 제시된 범위를 벗어날 경우, 이를 그대로 적용하면 유출량이 제대로 모의되지 않을 수 있으며 이에 대한 고려가 필요하다.

수질모델은 대상수체에서 일어나는 수리현상과 수질반응기작을 수식화하여 유입 오염물질에 따른 수질변화를 예측할 수 있도록 한 것으로, 효과적인 수질관리를 위하여

널리 이용되고 있다. 수질모형은 대부분 물리적 매개변수 기반 분포형 모형으로 오염물질의 기작 및 이송과정을 모의하고 파악할 수 있는 장점이 있다. 수질모형은 적용범위에 따라 포장단위 모형과 유역단위 모형으로 나뉘며, 유역단위 오염부하량 모의를 위해 자주 사용되는 수질모형은 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) (Donigian et al., 1984), SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998), AGNPS (AGricultural Non-Point Source) (Young et al., 1989), SWMM (Storm Water Management Model) (Huber and Dickinson, 1988) 등이 있다 (강문성 등, 2009; 정한석, 2014). 이들 수질모형은 수문사상과 대상지역에 따라 적합한 모형이 선택되어 사용되며, 유역 내 다양한 시나리오를 적용하여 오염부하량의 변동을 모의하는 연구가 다수 진행되고 있다 (Shen et al., 2013; Zhang et al., 2013; Que et al., 2015; 강문성 등, 2009; 정충길 등, 2013; 김민주 등, 2014). 이와 같은 유역수질모형은 구체적인 수문/수질 모의과정을 묘사할 수 있으나, DEM, 토지이용 등 공간분포형 입력자료로 인한 많은 매개변수는 모의 과정을 복잡하게 하며, 보정 과정에 있어 많은 시간과 노력을 요구하는 단점이 있다.

수질모형에 비해 비교적 간단하게 오염부하량을 추정하는 방법으로 유량-부하량 관계식과 같은 통계적 분석에 의한 회귀식이 사용된다. 회귀식은 실측된 유량 및 수질 데이터를 통계분석하여 산정되며, 수문모델이나 실측을 통해 구축된 유량자료를 회귀식에 대입하여 모의함으로써 산정한다 (엄명철, 2004). 오염부하량을 모의하는 회귀식은 다양한 형태가 존재하며, 최근에는 LOADEST (LOAD ESTimator)를 이용하여 회귀식을 개발하는 연구가 증가하고 있다. LOADEST는 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 개발한 회귀식 기반 프로그램으로 다양한 연구자들에 의해 이용되고 평가되고 있다. 국외에서는 Carey et al. (2011), Jha et al. (2013), Das et al. (2013) 등이 적용성을 검토한 사례가 있으며, 국내에서는 신민환 등 (2009), 박윤식 (2014)이 적용성을 검토한 바 있다. 그러나 이들 회귀식은 특정 유역을 대상으로 개발된 모형으로 수문·수질 자료가 없는 미계측 유역에 적용하는 것에는 어려움이 있다.

유출량 해석과 관련된 연구에서는 회귀식의 미계측 유역 적용을 위해 개념적 수문모델이나 회귀식의 매개변수를 지역화하는 연구가 다수 진행된바 있다. 국외에서는 Yokoo et al. (2001), Heouvelmans et al. (2006), Young (2006), Hundecha et al. (2008) 등이 유출량 모의를 위한 회귀식 계수와 모형 매개변수를 지역화하는 연구를 진행한바 있으며, 국내에서도 개념적 모형인 탱크모형의 매개변수를 지역화하는 연구를 다양한 연구자들이 진행해온바 있다 (김현영과 박승우, 1988; 허유만 등, 1992; 김선주 등, 2000; 안지현, 2013). 이와 같이 유출량 해석분야에서는 개념적 모형과 회귀식을 미계측 유역에 적용하기 위해 매개변수 지역화를 위한 다양한 시도가 이어져 왔으나, 오염부하량 산정의 경우 1990년 미국에서 Driver와 Tasker가 미국의 도시유역을 대상으로 토지이용 및 기후특성을 고려한 강우시 오염부하량 모의 회귀식을 개발한 이래로 국내외적으로 오염부하량 회귀식을 미계측 유역에 적용한 연구사례는 부족한 상황이다.

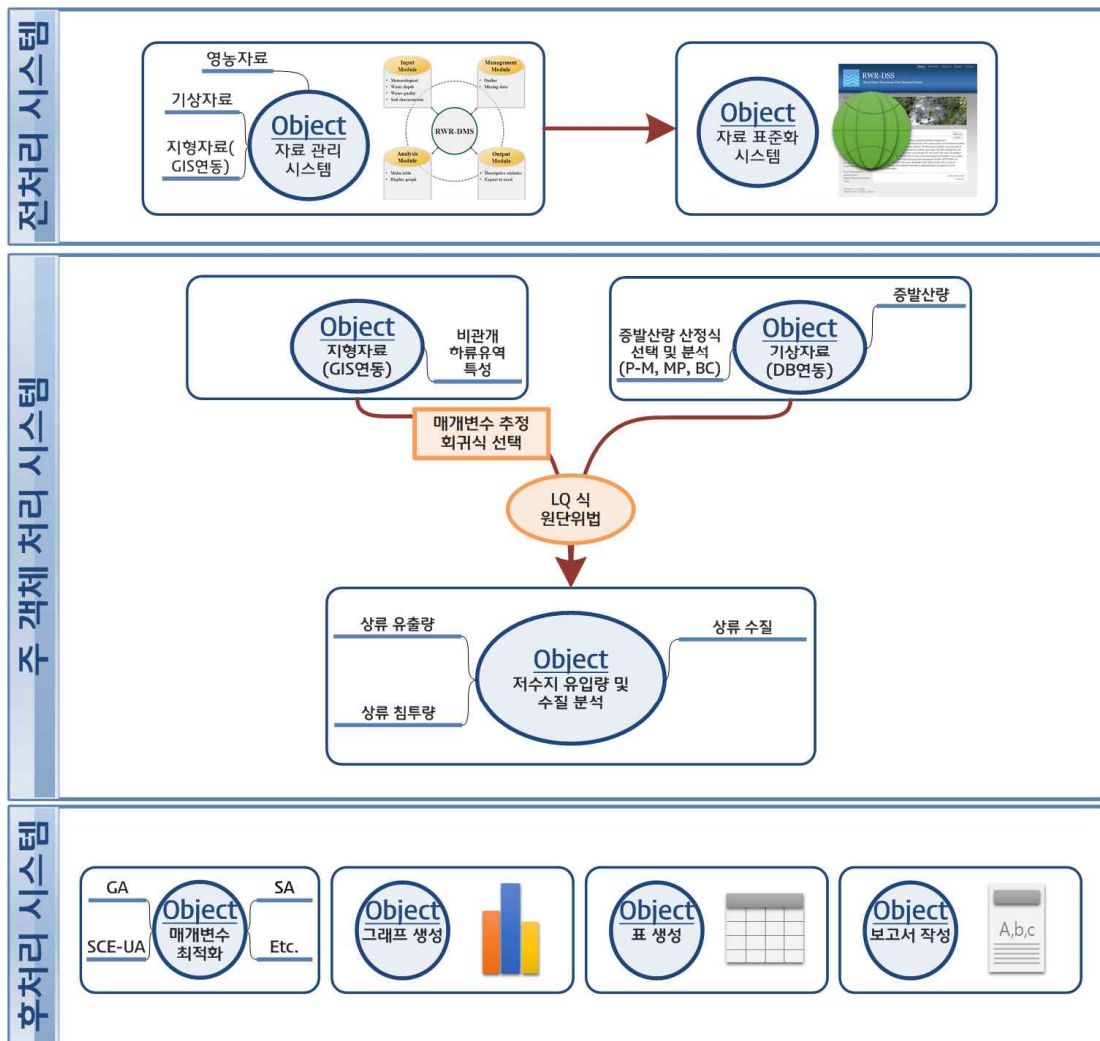
본 장에서는 저수지 상류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용을 위해 ① Tank 모형 매개변수 추정 지역화식 개발하고, ② 개발된 지역화식을 적용한 Tank 모형을 이용해

유역 유출을 모의하여 적용성을 평가하고, ③ SWAT 모형에 의한 유역 유출 모의 결과와 비교하여 활용성을 평가하고, ④ 유역특성에 따른 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정방법을 개발하여, 저수지 상류유역의 물순환 해석기법을 개발하고자 한다.

2. 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 구성

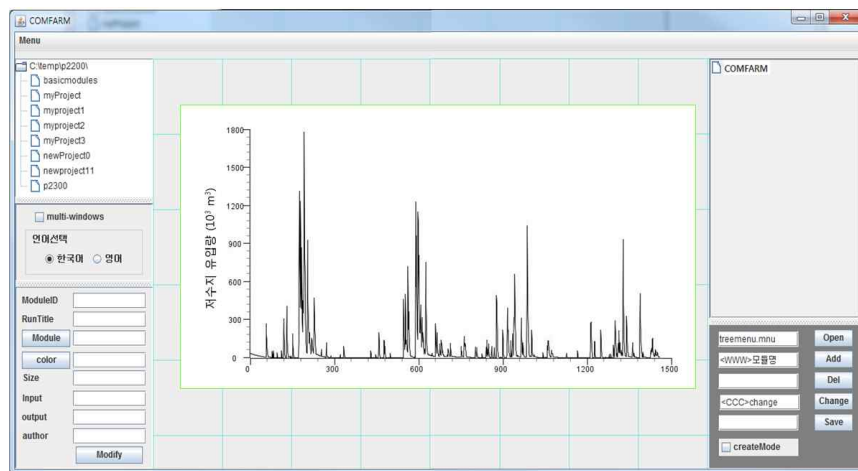
본 연구에서 개발한 저수지 상류유역 물순환 해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COmponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)에 내재되어 구동이 되도록 개발하였다. COMFARM에 대한 자세한 설명은 [제 3 장 제 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

(그림 3-1-1)은 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성을 보여주고 있다. 모형은 COMFARM의 전처리 시스템인 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 데이터베이스에서 제공하는 시간·공간·영농자료를 통해 입력 자료를 쉽게 구축할 수 있다. AWR-DMS에 관한 자세한 설명은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다. 모형의 주 객체 처리 시스템에서는 저수지 상류유역의 물순환을 해석하기 위한 요소기술이 내재되어 있다.



(그림 3-1-1) COMFARM기반 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 구성

저수지 상류유역의 유출량은 수정 3단 Tank 모형과 매개변수 추정 지역화식으로부터 추정한다. 매개변수 지역화식은 표준화 시스템과 연동하여 상류유역의 특성에 따라 수정 3단 Tank 모형의 매개변수를 출력되며, 이를 통해 미계측 유역에 적용할 수 있다. 수정 3단 Tank 모형은 매개변수 지역화식을 도출된 매개변수와 강우량과 유역 증발산량 등의 기상자료를 입력받아 유역 유출량을 추정한다. 여기서, 강우량과 유역 증발산량을 산정하기 위한 기온, 습도, 풍속, 일사량 등의 기상자료는 AWR-DMS과 연동하여 입력받는다. 유역 증발산량은 Penman-Monteith 식, 수정 Penman 식, Blaney-Criddle 식 중 사용자가 선택하여 이용할 수 있다. 상류유역의 오염부하량은 수정 3단 Tank 모형을 통해 모의된 유출량과 LOADEST 회귀모형을 통해 산정된다. 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 출력 결과인 유출량 및 오염부하량은 COMFARM의 후처리시스템을 통해 그래프, 표, 보고서 작성 컴포넌트를 통해 출력할 수 있다. 또한 매개변수 최적화 컴포넌트에서는 상류 유출량 또는 오염부하량의 실측 자료를 보유하고 있는 경우 모의 요소에 대해 매개변수에 대해 자동보정 및 검정을 수행할 수 있다. (그림 3-1-2)는 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 출력 결과를 보여주고 있다. 모의 기작에 대한 자세한 설명은 다음 절에 기술되어 있다.



(그림 3-1-2) 저수지 상류유역 물순환 해석 모형의 출력 화면

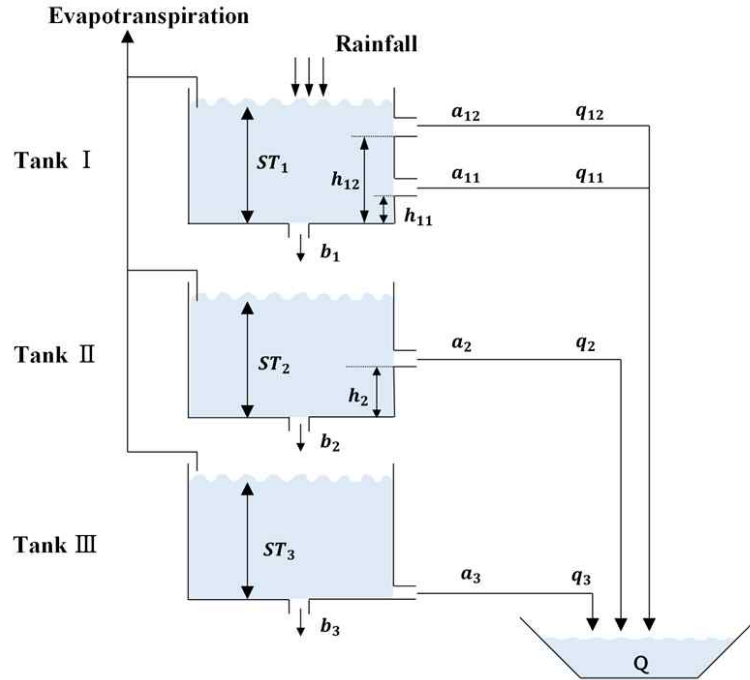
3. 미계측 저수지 상류유역 수문 해석 모형의 개발 및 적용

3.1. Tank 모형 매개변수 추정 지역화식 개발

가. Tank 모형

TANK 모형은 Sugawara(1961)에 의해 제안된 모형으로 유역을 몇 개의 유출공을 가지는 tank로 개념화하여 직렬 또는 병렬로 연결한 것이다. 장기 유출 해석을 위한 TANK 모형은 3 ~ 4개의 tank로 구성되어 있으며, 유출량은 각 tank의 감수곡선을 중첩하여 계산하는 것으로, 초기 손실량 등이 모형에 포함되어 있으므로 유효우량을 계산할 필요가 없다. 그러나, 모형의 매개변수가 물리적인 의미를 가지는 것이 아니므로, 실측 자료를 통한 매개변수 보정 과정이 필요하며, 하도에 의한 저류효과를 고려하고 있지 않다.

김현영과 박승우 (1988)는 국내의 중소유역에서의 유출 지체시간이 짧고 기저유출 부분의 기울기가 급하다는 점을 감안하여 기존의 4단 tank를 생략하고, 1단 tank의 유출공의 수를 2개로 개선하여 수정 3단 TANK 모형을 제안하였다. (그림 3-1-3)은 수정 3단 Tank 모형의 구성도이다.



(그림 3-1-3) 3단 Tank 모형의 구성도

(그림 3-1-3)의 Tank 모형으로부터 유출량은 식 (3-1-1)로 정의된다.

$$Q_t = q_{11} + q_{12} + q_2 + q_3 \quad (3-1-1)$$

여기서, Q_t 는 t 일의 일유출량 (mm), q_{11} , q_{12} 은 상단 tank의 유출량 (mm), q_2 는 중간 tank의 유출량 (mm), q_3 은 하단 tank의 유출량 (mm)이다. 이 때, 상단 tank의 유출량은 강우 즉시 발생하는 유출량으로 지표유출과 유사하며, 중간 tank 유출량은 중간유출량, 하부 tank는 기저 유출량을 나타낸다.

(1) 지표유출 (q_{11} , q_{12})

지표유출량은 (그림 3-1-3)의 상단 tank에 있는 2개의 유출공에서의 유출량의 합으로 정의된다. q_{11} 은 상단 tank 상부유출공으로부터의 유출량, q_{12} 는 상단 tank 하부유출공으로부터의 유출량이다. 각 유출공으로부터의 유출량은 식 (3-1-2), (3-1-3)의 저류량-유출량의 관계로부터 다음과 같이 정의된다.

$$q_{11} = a_{11}(ST_1 - h_{11}) \quad \text{when, } ST_1 > h_{11} \quad (3-1-2)$$

$$q_{12} = a_{12}(ST_1 - h_{12}) \quad \text{when, } ST_1 > h_{12} \quad (3-1-3)$$

여기서, ST_1 은 상단 tank 저류량 (mm), h_{11} , h_{12} 는 상단 tank 유출공의 높이 (mm), a_{11} , a_{12} 는 각 유출공의 저류계수이다.

(2) 중간유출 (q_2)

중간 유출 q_2 는 식 (3-1-4)와 같다.

$$q_2 = a_2(ST_2 - h_2) \quad \text{when, } ST_2 > h_2 \quad (3-1-4)$$

여기서, S_2 는 중간 tank의 저류량 (mm), h_2 는 유출공의 높이 (mm), a_2 는 저류계수이다.

(3) 기저유출 (q_3)

기저유출 q_3 은 식 (3-1-5)와 같다.

$$q_3 = a_3(ST_3 - h_3) \quad \text{when } ST_3 > h_3 \quad (3-1-5)$$

여기서, S_3 은 하단 tank의 저류량 (mm), h_3 은 유출공의 높이 (mm), a_3 은 저류계수이다.

(4) 저류량 (ST)

각 tank에서의 저류량 ST 는 식 (3-1-6)으로 나타낼 수 있다.

$$ST_{i,t} = ST_{i,t-1} + U_{i,t} - q_{i,t} - E_{i,t} - D_{i,t} \quad (3-1-6)$$

여기서, $ST_{i,t}$ 는 t 일의 i tank의 저류량 (mm), $ST_{i,t-1}$ 는 $t-1$ 일의 i tank의 저류량 (mm), $U_{i,t}$ 는 t 일의 강우량 (mm) 또는 $i-1$ 번 tank로부터의 유입량 (mm), $q_{i,t}$ 는 t 일의 유출량 (mm), $E_{i,t}$ 는 증발산량 (mm), $D_{i,t}$ 는 $i+1$ 번 또는 저류권역 아래로의 배수량 (mm)이다.

식 (3-1-6)에서 U 의 값은 상단 tank의 경우는 일강우량(R), 중간과 하부 tank에서는 각각 D_1 , D_2 가 된다.

(5) 배수량 (D)

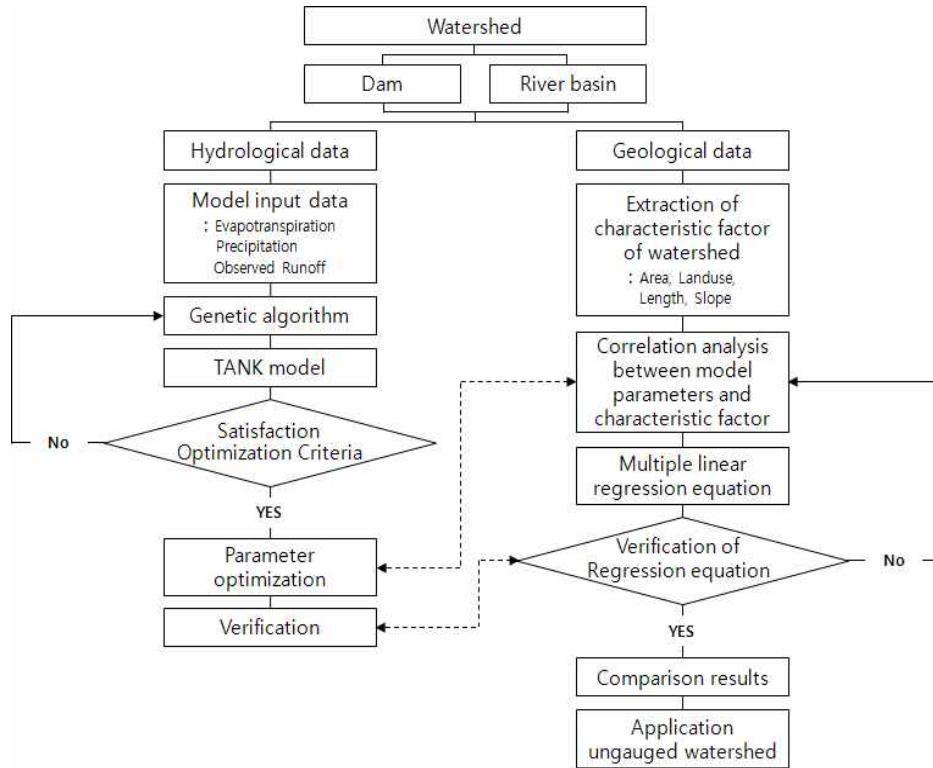
각 tank로부터 그 하단의 tank 또는 저류권역 아래로의 배수량은 식 (3-1-7)로 나타낼 수 있다.

$$D_i = b_i \times ST_i \quad (3-1-7)$$

여기서, D_i 는 i tank의 배수량 (mm), ST_i 는 저류량 (mm), b_i 는 배수계수이다.

나. 매개변수 최적화 및 매개변수 추정 회귀식 개발

본 연구에서는 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수를 최적화하고, 최적화된 매개변수와 유역특성인자 간의 상관분석과 다중회귀분석을 실시하였다. (그림 3-1-4)는 본 연구의 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발의 전체적인 연구 흐름도를 보여주고 있다.



(그림 3-1-4) TANK 모형 매개변수 추정 회귀식 개발 연구흐름도

본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 유전자 알고리즘은 자연적 유전현상의 원리에 기초한 적응적 탐색 (adaptive search) 기법이다 (Holland, 1975). 유전자 알고리즘은 자연선택의 과정을 모사하여 해를 찾아가는 알고리즘으로서 결과가 안 좋은 해는 진화 과정에서 도태되고, 더 나은 해를 나타내는 세트는 살아남는다. 진화를 거듭하면서 일부에서 돌연변이가 발생하여 해의 다양성을 유지함으로써 전역 최적해 (global optimum solution)를 구하도록 한다 (이성용 등, 2009).

TANK 모형의 매개변수 최적화에 있어 유전자 알고리즘의 이용은 김철과 김석규 (2004)와 이성용 등 (2009)이 우수한 통계적 변량을 도출하며 그 적용성을 검증한 바 있다. 유전자 알고리즘을 이용한 TANK 모형의 매개변수 최적화 방법은 송정현 등 (2014)에 상세히 서술되어 있다. 또한, 최근에는 농업용수 공급량의 보정 및 검정에도 이용되는 등 농업수자원 분야에 있어서도 널리 이용되고 있으며, 이에 대한 자세한 설명은 송정현 등 (2015)에 상세히 서술되어 있다.

목적함수로는 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)을 선정하여 해당

합수가 최소화하는 방향으로 매개변수 해가 진화되도록 구성하였다.

다. 지역화식 개발을 위한 자료구축

(1) 대상유역

본 연구에서는 국내의 다목적댐 상류와 하천수위관측소를 대상으로 관측 자료의 신뢰성이 높은 유역을 대상유역으로 선정하였다. 수문자료의 신뢰도가 비교적 높은 댐의 상류유역의 유출량은 유역 내 인위적인 용수사용량이 비교적 적을 뿐만 아니라 회귀수량 또한 댐 지점으로 들어오므로 자연유출량에 가깝다고 볼 수 있다.

대상유역으로 다목적댐 상류유역은 한강권역의 소양강댐, 횡성댐, 충주댐, 낙동강권역의 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 밀양댐, 금강권역의 대청댐, 용담댐, 보령댐, 부안댐, 섬진강권역의 섬진강댐, 주암댐, 영산강권역의 탐진댐 등 총 15개 유역을 선정하였다. 하천수위관측소 유역은 건설교통부 및 한국수자원공사에서 관리하고 있는 수위관측소 중에서 자료가 양호한 지점으로 한강권역의 매일, 영월관측소, 낙동강권역의 소천, 신안, 지산, 효령, 가장관측소, 금강권역의 옥천, 천천, 송천, 기대교관측소, 섬진강권역의 장전, 영산강권역의 능주, 마륵, 어등관측소 등 총 15개 유역을 선정하였다. 또한, 괴산댐, 운문댐, 나주관측소, 석화관측소 등 4개 유역에 대하여 본 연구에서 개발된 지역화식을 기존 지역화식과 비교하여 그 적용성을 평가하였다.

<표 3-1-1>은 대상유역 및 적용유역의 유역면적 및 수문자료의 가용기간, 수문자료를 수집한 기상관측소를 정리하여 나타낸 것이다. 유역의 크기는 최소 59.0 km² (부안댐)에서 최대 6,661.6 km² (충주댐)까지 다양하게 분포하고 있으며, 대상유역의 위치는 (그림 3-1-5)에 도시하였다.



(그림 3-1-5) 대상유역의 위치

<표 3-1-1> 대상유역의 면적 및 기상, 수문자료의 가용기간

Watershed	Area (km ²)	Weather Station	Data Period		
			Meteorological (KMA1))	Hydrological (MOCT2), WAMIS3))	
Dam	Soyangang	2694.36	Chuncheon	1975 - 2012	1977.01.01 - 2012.12.31
	Hoengseong	207.88	Hongcheon	1975 - 2012	2001.01.01 - 2012.12.31
	Chungju	6661.58	Chungju	1990 - 2012	1990.01.01 - 2012.12.31
	Andong	1590.72	Andong	1983 - 2012	1990.01.01 - 2012.12.31
	Imha	1367.74	Andong	1983 - 2012	1993.01.01 - 2012.12.31
	Hapcheon	928.94	Hapcheon	1975 - 2012	1990.01.01 - 2012.12.31
	Namgang	2293.42	Jinju	1975 - 2012	2000.01.01 - 2012.12.31
	Milyang	103.47	Milyang	2002 - 2012	2002.01.01 - 2012.12.31
	Daecheong	4134.00	Daejeon	1975 - 2012	2001.01.01 - 2011.12.31
	Yongdam	930.43	Geumsan	1975 - 2012	2001.01.01 - 2003.12.31 2008.01.01 - 2011.12.31
	Boryung	162.29	Boryung	1999 - 2012	1999.01.01 - 2012.12.31
	Buan	59.00	Buan	1998 - 2012	1998.01.01 - 2012.12.31
	Seomjingang	763.47	Imsil	1976 - 2012	1980.01.01 - 2002.12.31 2004.01.01 - 2012.12.31
	Juam	1010.00	Suncheon	2000 - 2012	2000.01.01 - 2012.12.31
	Tamjin	192.34	Jangheung	1975 - 2012	2005.01.01 - 2012.12.31
	Gauging Station	Maeil	173.92	Wonju	1973 - 2012
Yeongweol		2281.32	Yeongweol	1995 - 2012	2006.01.01 - 2009.12.31
Socheon		660.94	Bongwha	1988 - 2012	2006.01.01 - 2010.12.31
Shinan		234.74	Sancheong	1973 - 2012	2006.01.01 - 2009.12.31
Jisan		156.75	Geochang	1973 - 2012	2006.01.01 - 2010.12.31
Okcheon		2942.88	Geumsan	1973 - 2012	2006.01.01 - 2010.12.31
Cheoncheon		290.60	Jangsu	1988 - 2012	2006.01.01 - 2010.12.31
Songcheon		349.70	Chupungryong	1960 - 2012	2006.01.01 - 2010.12.31
Jangjeon		267.68	Suncheon	2000 - 2012	2006.01.01 - 2008.12.31
Mareuk		689.84	Gwangju	1975 - 2012	2006.01.01 - 2008.12.31 2010.01.01 - 2010.12.31
Application areas	Goisan	676.73	Buyeo	1973 - 2012	2004.01.01 - 2012.12.31
	Unmun	304.88	Yeongcheon	1973 - 2012	2004.01.01 - 2012.12.31
	Seokhwa	1580.33	Cheongju	1967 - 2012	2007.01.01 - 2011.12.31
	Naju	2,055.80	Gwangju	1960 - 2012	2007.01.01 - 2009.12.31

- 1) KMA: Korea Meteorological Administration
 2) MOCT: Ministry Of Construction and Transportation
 3) WAMIS: Water Management Information System

(2) 지형자료 및 GIS 자료 구축

대상유역의 일별 유출량은 지형인자와도 밀접한 관련을 갖는다. 지형인자는 유역의 지하학적 특성, 배수 특성, 토양, 토지이용상태 등 여러 인자로 설명된다. 본 연구에서는 유출에 영향을 주는 유역면적, 토지이용상태, 주하천연장, 유역경사 등을 이용하여 Tank 모형 매개변수와의 회귀분석을 실시하였다. <표 3-1-2>는 대상유역의 유역특성인자를 나타낸다.

<표 3-1-2> 대상유역의 유역면적 및 토지이용 비율

Watershed	Area (km ²)	Paddy (%)	Upland (%)	Forest (%)	Length (km)	Slope (%)	
							Dam
	Hoengseong	207.88	4.00	7.40	81.50	28.71	41.13
	Chungju	6661.58	2.00	8.20	82.80	274.04	34.89
	Andong	1590.72	2.60	7.30	81.90	166.41	42.39
	Imha	1367.74	3.30	7.60	82.00	122.75	40.35
	Hapcheon	928.94	9.90	5.30	75.40	63.00	34.87
	Namgang	2293.42	11.20	4.80	74.60	12.52	35.36
	Milyang	103.47	6.00	3.50	83.70	28.06	48.73
	Daecheong	4134.00	8.70	8.30	72.50	253.27	35.80
	Yongdam	930.43	8.10	6.40	78.10	62.60	37.52
	Boryung	162.29	6.30	4.00	80.70	22.30	36.90
	Buan	59.00	9.50	8.80	72.50	18.90	43.15
	Seomjingang	763.47	8.50	6.60	74.40	82.40	32.78
Gauging Station	Juam	1010.00	11.10	5.70	73.20	90.50	31.76
	Tamjin	192.34	7.92	3.44	86.59	27.67	37.94
	Maeil	173.92	7.88	0.56	90.14	25.17	47.60
	Yeongweol	2281.32	9.37	1.22	84.68	161.40	15.20
	Socheon	660.94	5.98	1.64	92.22	76.57	4.05
	Shinan	234.74	12.68	6.42	80.72	35.34	3.40
	Jisan	156.75	7.13	12.81	79.77	25.04	1.80
	Okcheon	2942.88	11.49	6.51	77.40	154.22	8.50
	Cheoncheon	290.60	9.04	6.41	77.25	30.73	34.60
	Songcheon	349.70	10.12	0.59	82.82	63.24	0.78
Application areas	Jangjeon	267.68	8.32	2.64	84.15	37.68	4.59
	Mareuk	689.84	33.54	3.44	46.80	54.29	4.45
	Goisan	676.73	14.80	7.50	72.50	78.45	36.87
	Unmun	304.88	6.59	4.69	86.15	38.16	1.43
	Seokhwa	1580.33	28.67	14.28	47.19	63.89	8.41
	Naju	2,055.80	10.00	19.40	57.40	68.96	24.46

(3) 기상 및 수문자료

대상유역의 댐 수문자료 및 유역평균우량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)와 건설교통부에서 수집한 일자료를 비교·분석하여 이용하였으며, 하천수위관측소자료는 홍수통제소에서 제공하는 2006년부터 2010년까지의 일유량 자료를 이용하였다.

<표 3-1-3>은 각 대상 유역별로 강수량, 유출량 등에 대한 기본 평균값과 표준편차를 산정하여 정리한 것이다. 연평균 강수량은 다목적댐유역에서 1,000 mm ~ 1,700 mm, 하천유역에서 1,100 mm ~ 1,500 mm로 나타났으며, 연평균 유출량은 다목적댐유역에서 700 mm ~ 1,100 mm, 하천유역에서 400 mm ~ 1,100 mm로 나타났다. 연평균 유출률은 다목적댐유역이 45 % ~ 70 %, 하천유역이 30 % ~ 75 %로 분석되었다.

<표 3-1-3> 대상유역의 기상 및 수문 특성

Watershed	Annual precipitation (mm)		Annual runoff (mm)		Runoff ratio (%)	
	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>	\bar{X}	<i>s</i>
	Maeil	1329.5	20.2	924.6	8.8	69.5
Yeongweol	1266.2	12.2	820.0	7.9	64.8	17.7
Socheon	1111.2	10.8	679.7	5.4	61.2	11.4
Shinan	1353.7	14.3	886.2	9.9	65.5	15.0
Jisan	1256.0	12.8	657.6	5.7	52.4	18.1
Okcheon	1213.1	12.5	403.2	3.0	33.2	9.4
Cheoncheon	1395.7	12.5	625.3	5.3	44.8	8.9
Songcheon	1134.7	10.3	491.0	4.8	43.3	3.6
Jangjeon	1495.3	13.9	478.5	5.4	32.0	9.3
Mareuk	1430.3	13.4	1076.0	5.8	75.2	2.4

<표 3-1-3> 대상유역의 기상 및 수문 특성 (계속)

Watershed	Annual precipitation (mm)		Annual runoff (mm)		Runoff ratio (%)		
	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s	
Dam	Soyangang	1243.0	12.4	835.5	7.3	67.2	8.6
	Hoengseong	1534.0	15.6	919.3	9.1	59.9	11.2
	Chungju	1281.8	12.0	831.4	7.1	64.9	12.1
	Andong	1212.3	11.5	672.2	5.8	55.4	9.9
	Imha	1019.7	9.8	522.4	5.6	51.2	17.0
	Hapcheon	1320.3	12.6	726.0	5.9	55.0	12.6
	Namgang	1645.4	15.8	1144.5	10.4	69.6	13.0
	Milyang	1542.4	16.7	1017.4	11.5	66.0	11.4
	Daecheong	1251.5	11.0	832.0	6.4	66.5	15.1
	Yongdam	1643.0	13.0	1066.4	7.6	64.9	17.4
	Boryung	1417.4	14.2	874.8	8.9	61.7	13.4
	Buan	1423.5	14.2	884.7	9.9	62.2	12.7
	Seomjingang	1475.4	15.7	686.6	6.4	46.5	11.0
	Juam	1552.8	14.8	746.9	7.0	48.1	10.7
	Tamjin	1526.7	14.1	856.0	7.9	56.1	6.9

라. 매개변수 추정 지역화식 개발

(1) 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형의 매개변수 최적화

모형의 매개변수를 결정하기 위해 가용 자료기간을 보정기간과 검정기간으로 구분하여 보정기간에 대해 매개변수를 결정하고, 검정기간에 대해 결정된 매개변수의 정확도를 평가하였다.

<표 3-1-4>는 Tank 모형의 보정과 검정에 사용된 자료기간을 나타내고 있다. 합천댐, 용담댐, 부안댐, 섬진강댐의 경우 보정기간에 비하여 검정기간에 정확도가 높게 평가되어 기존에 구분한 검정기간 자료를 보정기간으로 적용하여 매개변수를 추정하였다.

<표 3-1-4> Tank 모형의 보정 및 검정 기간

Watershed	Data period	Calibration	Validation	
Dam	Soyangang	1977 - 2012	2001 - 2012	
	Hoengseong	2001 - 2012	2008 - 2012	
	Chungju	1990 - 2012	2003 - 2012	
	Andong	1990 - 2012	2003 - 2012	
	Imha	1993 - 2012	2003 - 2012	
	Hapcheon	1990 - 2012	1990 - 2002	
	Namgang	2000 - 2012	2007 - 2012	
	Milyang	2002 - 2012	2008 - 2012	
	Daecheong	2001 - 2012	2008 - 2012	
	Yongdam	2001 - 2003 2008 - 2011	2008 - 2011	2002 - 2003
	Boryung	1999 - 2012	1999 - 2005	2006 - 2012
	Buan	1998 - 2012	2006 - 2012	1998 - 2005
	Seomjingang	1980 - 2002 2004 - 2012	2004 - 2012	1980 - 2002
	Juam	2000 - 2012	2000 - 2006	2007 - 2012
	Tamjin	2005 - 2012	2005 - 2008	2009 - 2012

<표 3-1-4> Tank 모형의 보정 및 검정 기간 (계속)

	Watershed	Data period	Calibration	Validation
Gauging Station	Maeil	2007 - 2009	2007 - 2008	2009 - 2009
	Yeongweol	2006 - 2009	2006 - 2008	2009 - 2009
	Socheon	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010
	Shinan	2006 - 2009	2006 - 2008	2009 - 2009
	Jisan	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010
	Okcheon	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010
	Cheoncheon	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010
	Jangjeon	2006 - 2008	2006 - 2007	2008 - 2008
	Songcheon	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010
	Mareuk	2006 - 2010	2006 - 2008	2009 - 2010

① 매개변수 초기치 결정

최적화 방법에 의한 유출모형의 매개변수를 추정하기 위해서는 모형의 매개변수 초깃값이 필요하다. 모형의 매개변수 초깃값을 결정할 때는 모형의 매개변수가 가지는 물리적 의미를 이해하고 매개변수의 물리적 허용범위 내에서 적절하게 결정하여야 한다. TANK 모형의 매개변수는 유출공 계수 4개, 침투 계수 3개, 유출공 높이 3개, 최하단의 초기 저류고 등 총 11개이다. 수자원 계획의 최적화 연구 (Ⅲ) (건설교통부, 1999)는 시산개시일이 1월 1일일 때, 전년도 12월 말에 큰 강우가 없을 경우, 1단 TANK와 2단 TANK는 0.0 mm, 3단 TANK는 30.0 mm을 각 TANK의 초기 저류고로 제안한 바 있으며, 기타 변수들의 초깃값은 김철과 김석규 (2004)가 이용한 값을 사용하였다. TANK 모형의 유출량 모의 시 입력되는 자료 중 증발산량은 Penman-Monteith 법을 이용하여 산정하였으며, 매개변수의 범위는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위를 이용하였다. <표 3-1-5>는 각 매개변수의 범위와 초깃값을 나타낸다.

<표 3-1-5> TANK 모형의 초깃값 및 매개변수 범위

Parameters	Symbols	Range	Initial values
Storage of 1st Tank	S1	0.0	0.000
Storage of 2nd Tank	S2	0.0	0.000
Storage of 3rd Tank	S3	10 ~ 100	30.000
Area of upper side outlet in 1st Tank	A11		0.260
Area of upper side outlet in 1st Tank	A12	0.1 ~ 0.5	0.160
Area of bottom outlet in 1st Tank	B1		0.330
Area of side outlet in 2nd Tank	A2	0.03 ~ 0.1	0.090
Area of bottom outlet in 2nd Tank	B2	0.01 ~ 0.1	0.080
Area of side outlet in 3rd Tank	A3	0.005 ~ 0.1	0.007
Area of bottom outlet in 3rd Tank	B3		0.006
Height of upper side outlet in 1st Tank	H11	5 ~ 60	30.000
Height of lower side outlet in 1st Tank	H12		15.000
Height of upper side outlet in 2nd Tank	H2	0 ~ 50	10.000
Height of upper side outlet in 3rd Tank	H3	0 ~ 30	10.000

② 매개변수 최적화

매개변수 보정은 대상유역의 초깃값을 이용하여 유전자알고리즘으로 수행하였으며, 보정된 매개변수를 TANK 모형에 적용하여 유출을 모의하였다. 실측 유출량과 모의 유출량과의 일치 정도와 모형의 정확성을 판별하기 위하여 3가지의 통계적 변량을 이용하여 <표 3-1-6>에 나타내었다. 모의 결과를 통계적으로 평가하기 위한 기준으로는 실측치와 모의치의 회귀분석에 의해 계산되는 결정계수 (R^2)를 사용하였고, 모형의 정확성을 파악하기 위한 기준으로는 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 Nash and Sutcliffe Efficiency (NSE)를 이용하였으며, 절대적인 오차 정도를 계산하기 위해서 RMSE를 이용하였다. NSE는 $-\infty \sim 1.0$ 의 범위로 나타나고 1.0의 값에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미하며, 만약 음수 값이 나타나면 모의 결과를 이용하는 것보다 실측치의 평균을 이용하는 것이 더 좋을 것을 의미한다 (송정현 등, 2013; 송정현 등, 2015).

황성댐, 합천댐, 밀양댐, 부안댐, 탐진댐 유역 및 매일, 지산, 천천 수위관측소 유역은 R^2 와 NSE가 0.9 이상으로 나타나 높은 적합도를 보였으며, 다른 유역에서도 결정계수와 NSE가 0.8 이상으로 나타났다. RMSE는 모든 적용대상 유역에서 5 mm/day 이하로 나타났다. Moriasi et al. (2007)은 월단위 유출량 모의에 대해 $0.75 < NSE \leq 1.00$ 이면 “very good”으로, $0.65 < NSE \leq 0.75$ 이면 “good”으로, $0.50 < NSE \leq 0.65$ 이면 “satisfactory”, $NSE \leq 0.50$ 이면 “unsatisfactory”와 같은 기준을 제시하고 있다. 일반적으로 모의결과는 시간간격이 짧을수록 통계적 변량이 낮게 나타나기 때문에 (Engel et al., 2007), 본 연구에서의 모형의 보정기간의 결과는 모두 “very good”으로 평가할 수 있다.

(그림 3-1-6)은 보정기간 동안 대상 유역에서의 연평균 유출량을 실측 연평균 유출량과 비교하여 보여주고 있다. 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비하여 다소 과소 추정되었으나 대부분 근접하게 모의되었으며, 수문곡선 또한 실측 데이터의 경향성을 잘 나타내었다.

<표 3-1-6> TANK 모형의 보정 결과

statistics \ watershed	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Ratio ¹⁾	0.68	0.99	0.66	0.69	0.79
RMSE (mm/day)	2.91	2.92	2.92	2.25	2.22
R^2	0.85	0.92	0.83	0.86	0.86
NSE ²⁾	0.84	0.92	0.81	0.85	0.85
statistics \ watershed	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daecheong	Yongdam
Ratio ¹⁾	0.94	0.87	0.93	0.70	0.79
RMSE (mm/day)	1.94	4.23	3.87	2.83	2.42
R^2	0.91	0.84	0.92	0.85	0.90
NSE ²⁾	0.91	0.84	0.92	0.83	0.88

1) Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

2) NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency

<표 3-1-6> TANK 모형의 보정 결과 (계속)

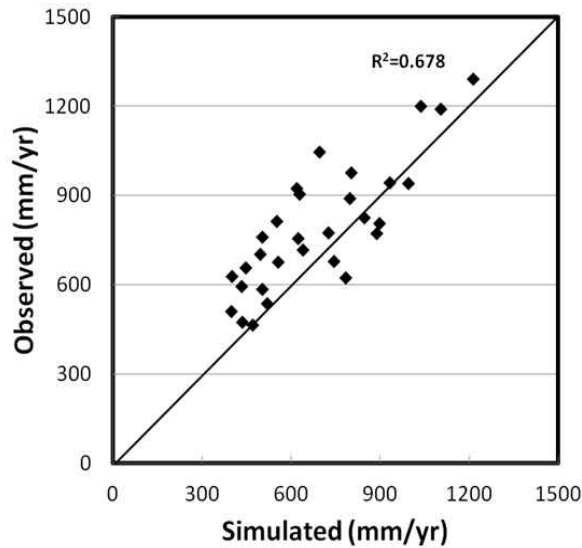
watershed	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Ratio ¹⁾	0.94	0.83	0.82	1.16	1.12
RMSE (mm/day)	3.81	3.34	2.92	2.45	2.35
R ²	0.85	0.91	0.87	0.88	0.90
NSE ²⁾	0.85	0.90	0.87	0.87	0.90

watershed	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Ratio ¹⁾	0.95	0.90	0.83	1.06	1.10
RMSE (mm/day)	2.50	3.48	2.51	4.22	1.82
R ²	0.92	0.85	0.84	0.85	0.91
NSE ²⁾	0.92	0.85	0.84	0.85	0.91

watershed	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon	Jangjeon	Mareuk
Ratio ¹⁾	0.92	0.97	1.02	1.26	0.67
RMSE (mm/day)	1.09	1.07	1.63	2.13	2.11
R ²	0.88	0.92	0.89	0.89	0.88
NSE ²⁾	0.88	0.92	0.89	0.88	0.85

1) Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

2) NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency



(그림 3-1-6) 보정기간 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도

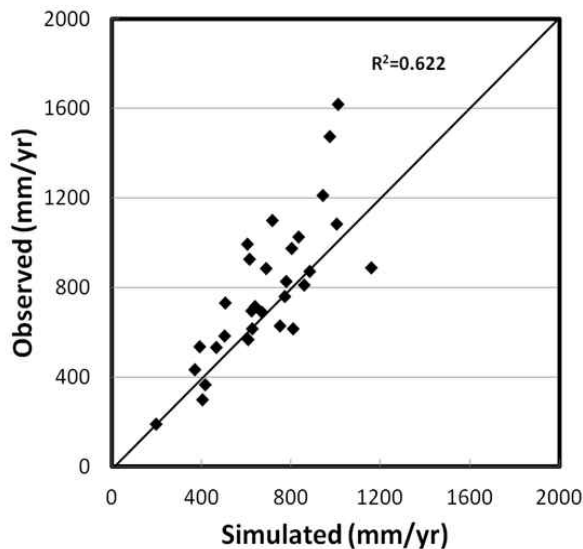
③ 매개변수 검정

각 대상유역에 대해 추정된 매개변수를 검정기간에 적용하여 그 통계적 결과를 <표 3-1-7>에 제시하였으며, 검정기간에 대하여 적용유역에서 모의된 연평균 유출량을 실측 연평균 유출량과 비교하여 (그림 3-1-7)에 나타내었다. 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비하여 과소 추정되는 경향을 보였다. 또한, 보정기간에 비하여 RMSE 값은 높게, R²와 NSE는 낮게 나타났으나, 전체적으로 NSE가 0.7 이상으로 나타나 Moriasi et al. (2007)의 기준에서 “very good” 또는 “good”으로 평가되었다.

<표 3-1-7> TANK 모형의 검정 결과

statistics \ watershed	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Ratio ¹⁾	0.783	1.307	0.664	0.902	0.736
RMSE (mm/day)	3.569	3.096	3.539	3.078	2.527
R ²	0.783	0.838	0.785	0.733	0.825
NSE ²⁾	0.777	0.813	0.771	0.713	0.780
statistics \ watershed	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daecheong	Yongdam
Ratio ¹⁾	0.977	0.930	1.059	0.694	0.662
RMSE (mm/day)	2.223	4.206	2.796	2.478	3.878
R ²	0.838	0.838	0.901	0.836	0.856
NSE ²⁾	0.838	0.836	0.901	0.809	0.834
statistics \ watershed	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Ratio ¹⁾	0.943	0.824	0.897	1.314	0.780
RMSE (mm/day)	3.258	4.599	3.424	2.742	2.842
R ²	0.834	0.771	0.720	0.860	0.889
NSE ²⁾	0.834	0.764	0.716	0.852	0.884
statistics \ watershed	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Ratio ¹⁾	0.625	1.022	1.079	1.152	1.195
RMSE (mm/day)	3.576	2.170	1.987	3.601	1.823
R ²	0.839	0.841	0.777	0.826	0.900
NSE ²⁾	0.839	0.841	0.771	0.822	0.896
statistics \ watershed	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon	Jangjeon	Mareuk
Ratio ¹⁾	1.352	1.020	0.883	1.057	0.864
RMSE (mm/day)	1.192	2.161	1.855	0.489	2.281
R ²	0.864	0.908	0.887	0.876	0.864
NSE ²⁾	0.845	0.906	0.870	0.875	0.810

1) Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)
 2) NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency



(그림 3-1-7) 검정기간 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도

(2) 매개변수 추정 회귀식 개발

① 유역특성인자와 모형 매개변수 간 상관분석

본 연구에서는 매개변수와 유역특성인자와의 상관성을 규명하기 위하여 대상유역별 유역특성인자와 최적매개변수와의 상관분석을 실시하였다. 회귀식 개발에 사용될 지형인자들을 우선적으로 선정하기 위하여 변수선택법 (variable selection method) 중 전진선택법, 후진제거법 및 단계별선택법을 모두 적용 후, R^2 가 가장 높게 나타난 방법을 이용하였다. 회귀식 산정에 적용한 유역특성인자는 유역면적 (Area, km^2), 논, 밭, 그리고 산림의 토지이용비율 (Paddy, %; Upland, %; Forest, %), 유로연장 (Length, km), 유역평균경사 (Slope, %) 등이다. <표 3-1-8>은 유역특성인자와 최적매개변수 간 상관분석 결과를 나타내고 있다.

지표면 유출을 모의하는 1단 TANK에서 지표면 유출량을 결정하는 유출공 계수인 A11은 밭비율 대수값 (\ln_Upland)과 0.56로 가장 높은 상관관계를 보였고, A12는 유역경사 대수값 (\ln_Slope)과 0.43로 상관관계가 가장 높았으며, 다른 인자로는 논비율 (Paddy), 밭비율 (Upland)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 침투량을 조절하는 침투공 계수 B1은 밭비율 대수값 (\ln_Upland)과 0.58로 상관관계가 가장 높았고, 다음으로 유역경사가 높은 상관성을 보였다. 중간유출을 나타내는 2단 TANK의 경우 유출량을 결정하는 유출공 계수인 A2는 논비율, 산림비율 대수값, 유역경사와 상관성이 높았으며, 침투공 계수 B2는 유역면적 대수값과 상관성이 높았다. 비피압 지하수유출을 모의하는 3단 TANK의 유출공 계수인 A3는 유로연장 대수값, 밭비율과 상관성을 보였으며, 침투공 계수인 B3는 논비율, 산림비율의 영향이 큰 것으로 나타났다.

TANK 모형의 유출은 유출공 계수뿐만 아니라 TANK의 저류고에 비례한다. 따라서 각 단별 유출공 높이와 유역특성인자의 상관분석은 중요한 의미를 가진다. 지표면 유출을 발생시키는 H11은 유역경사와 산림비율의 영향이 크게 산정되었으며, H12는 유역면적, 유역경사 대수값의 상관도가 높게 나타났다. 3단 TANK의 저류고를 나타내는 ST3은 산림비율 외에 크게 영향을 미치는 인자는 나타나지 않았다.

<표 3-1-8> 유역특성인자와 TANK모형 매개변수 사이의 상관분석 결과

Watershed Characteristic	Parameter											
	A11	A12	A2	A3	B1	B2	B3	H11	H12	H2	ST3	
Paddy (%)	0.03	0.40	0.52	0.07	0.03	0.01	0.33	0.20	0.12	0.05	0.11	
Upland (%)	0.39	0.16	0.10	0.38	0.37	0.23	0.01	0.13	0.13	0.51	0.16	
Forest (%)	0.18	0.42	0.55	0.07	0.27	0.08	0.41	0.32	0.21	0.37	0.31	
Area (km^2)	0.20	0.25	0.18	0.19	0.14	0.34	0.14	0.04	0.49	0.16	0.10	
Length (km)	0.15	0.05	0.09	0.37	0.07	0.22	0.13	0.08	0.21	0.07	0.00	
Slope (%)	0.16	0.43	0.39	0.14	0.32	0.01	0.08	0.78	0.35	0.23	0.23	
$\ln(\text{Paddy})$	0.04	0.32	0.45	0.16	0.08	0.18	0.20	0.26	0.20	0.12	0.02	
$\ln(\text{Upland})$	0.56	0.03	0.04	0.33	0.58	0.15	0.12	0.27	0.18	0.64	0.25	
$\ln(\text{Forest})$	0.15	0.41	0.58	0.11	0.25	0.11	0.41	0.31	0.19	0.36	0.30	
$\ln(\text{Area})$	0.35	0.19	0.18	0.32	0.15	0.45	0.23	0.04	0.32	0.10	0.12	
$\ln(\text{Length})$	0.12	0.06	0.06	0.39	0.04	0.26	0.01	0.07	0.04	0.04	0.00	
$\ln(\text{Slope})$	0.44	0.43	0.40	0.08	0.31	0.06	0.13	0.60	0.33	0.22	0.24	

TANK 모형의 매개변수를 살펴보면 1단 TANK 유출공의 유출계수 A11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총유출량 또한 증가하게 된다. A11과 마찬가지로 A12 또한 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총유출량 또한 증가하게 된다. 2단 TANK 유출공의 유출계수인 A2는 중간유출과 관련이 있는 부분으로서, A2의 값이 커짐에 따라 3단 TANK의 유입보다 측벽 유출공을 통한 유출이 많아지므로 중간유출량이 증가하게 된다. 3단 TANK 유출공의 유출계수 A3는 유출량에 가장 낮은 민감도를 나타낸다. 또한, 1단 TANK 침투공의 침투계수인 B1은 그 값이 커짐에 따라 2단 TANK로의 유입이 많아지고, 측유출공의 유출량이 적어지므로 총유출량은 감소하게 된다. 반면에, 침투계수가 작을수록 2단 TANK로의 유입이 적고 측유출공의 유출량이 많아져서 총유출량은 증가하게 된다. B2, B3는 유출량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 1단 TANK 아래쪽 유출공의 높이를 나타내는 H11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 적어지므로 총유출량 또한 감소하게 된다. H12는 홍수 시 유출량에 영향을 많이 미치는데, 이는 H12의 높이가 1단 TANK의 유출공 중에서 가장 높아 적은 양의 강우로는 H12의 높이를 채울 수 없기 때문으로 사료된다.

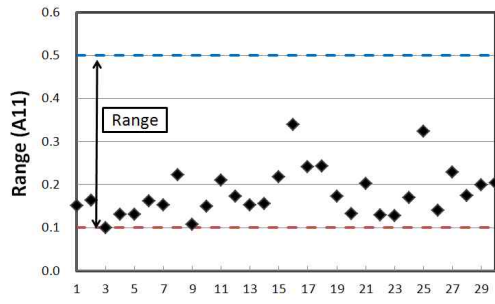
TANK 모형의 매개변수 중 유출량에 민감한 매개변수를 분석한 연구는 한성호 (1994), 김지용 등 (2001)에 의해 보고된 바 있다. 유출량 추정 시 민감한 변수들로 한성호 (1994)는 A11, B1, B2 및 H11 등을 제시하였으며, 김지용 등 (2001)은 A11, A12, B1 및 H12 등으로 제시하였다.

② 회귀식 개발

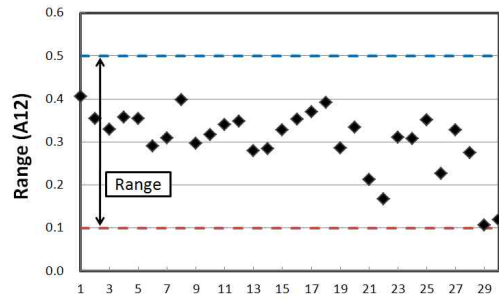
본 연구에서는 각 매개변수와 상관성이 높은 유역특성인자들을 대상으로 매개변수추정 회귀식을 개발하였다. TANK 모형의 매개변수를 종속변수로, 유역특성인자를 독립변수로 설정하여 다중회귀분석을 수행하였으며, R²와 자유도를 반영한 수정된 R²를 비교하며 매개변수를 진입 또는 제거하여 회귀식을 결정하였다. <표 3-1-9>는 개발된 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 보여주고 있다. 개발된 일반화식을 통해 산정된 매개변수는 Sugawara (1972)가 제시한 매개변수 범위에 포함되는 것으로 나타났다 (그림 3-1-8).

<표 3-1-9> TANK 모델 매개변수의 지역화식 개발 결과

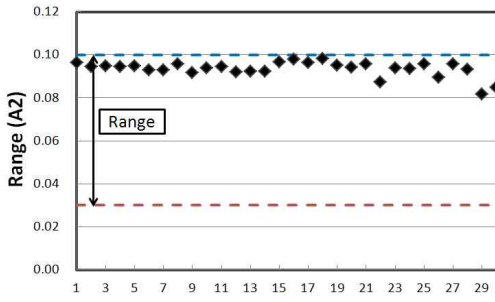
Parameters	Regression equation	R	R ²
A11	$-0.0003Slope - 0.017\ln(Area) - 0.067\ln(Upland) + 0.398$	0.60	0.36
A12	$-0.004Paddy + 0.001Forest + 0.163\ln(Slope) - 0.27$	0.56	0.31
A2	$9.897 \times 10^{-5}Paddy + 0.028\ln(Forest) + 0.0003\ln(Slope) - 0.03$	0.60	0.36
A3	$-0.0002Upland + 4.092 \times 10^{-5}\ln(Area) + 0.001\ln(Length) + 0.006$	0.58	0.34
B1	$0.003Slope - 0.101\ln(Upland) + 0.262$	0.59	0.35
B2	$-0.01\ln(Area) + 0.1$	0.64	0.41
B3	$7.086 \times 10^{-6}Paddy + 7.754 \times 10^{-5}Forest + 0.001$	0.55	0.31
H11	$0.318Forest - 0.543Slope + 22.018$	0.79	0.63
H12	$-0.004Area + 0.333Slope + 44.939$	0.69	0.48
H2	$0.421Forest + 15.412\ln(Upland) - 22.099$	0.65	0.42
St3	$1.147Forest - 49.086$	0.40	0.16
	43.013	-	-



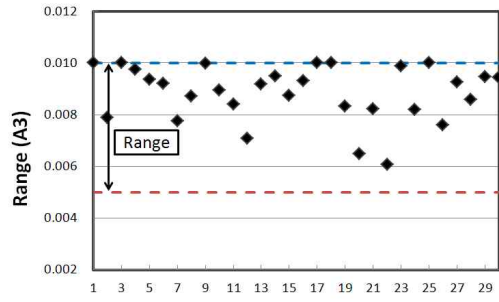
(a) A11



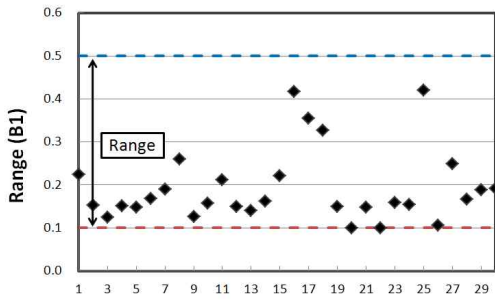
(b) A12



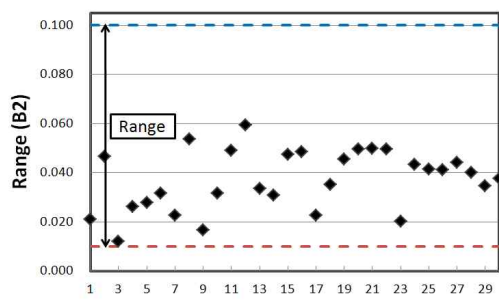
(c) A2



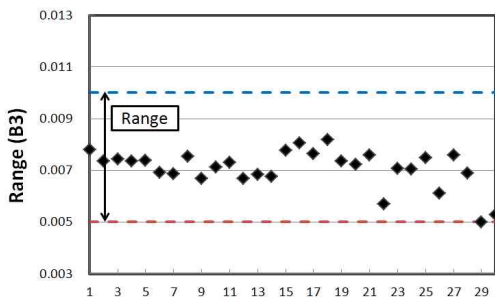
(d) A3



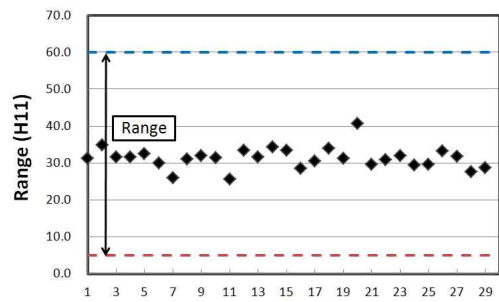
(e) B1



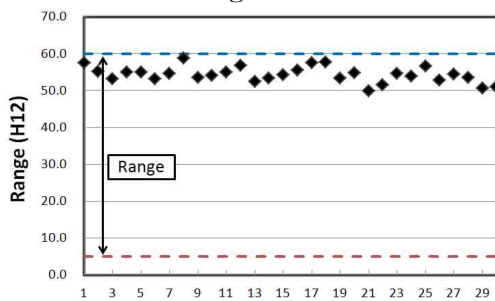
(f) B2



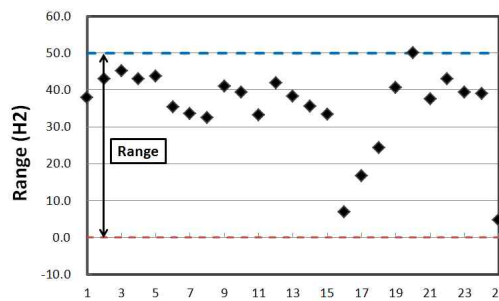
(g) B3



(h) H11



(i) H12



(j) H2

(그림 3-1-8) TANK 모형 매개변수의 범위

③ 회귀식 적용

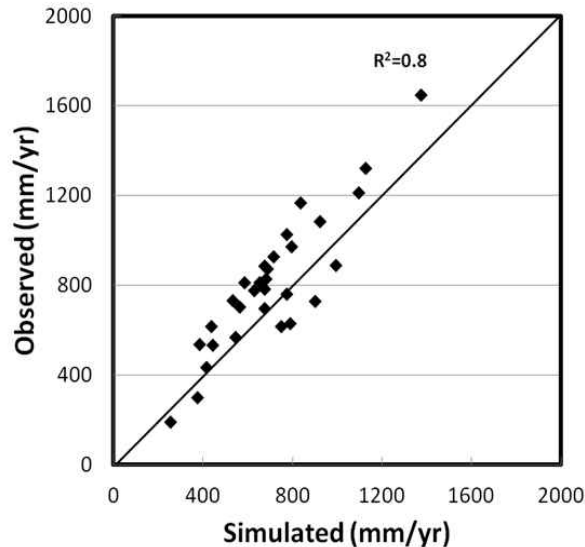
개발된 회귀식에 따라 산정된 매개변수를 TANK 모형에 적용하여 각 대상유역의 검정기간 동안 유출량을 모의하였으며, 그 결과를 비교·분석하여 <표 3-1-10>에 제시하였다. 검정기간 동안 모의된 연평균 유출량과 실측 연평균 유출량을 비교하여 (그림 3-1-9)에 나타내었다. 유전자 알고리즘으로 최적화된 매개변수의 결과 <표 3-1-7>과 비교하면 다소 통계적 결과가 안 좋게 나타나지만, 소천 유역을 제외하면 NSE가 0.75 이상으로 나타나 Moriai et al. (2007)의 기준의 가장 높은 등급인 “very good”으로 평가되어 회귀식의 적용성이 높은 것으로 사료된다. 소천 유역은 NSE가 0.6으로 다른 유역에 비해 비교적 낮게 되었으나 Moriasi et al. (2007)의 기준에서 “satisfactory”로 평가되기 때문에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 일부 유역에서 모의된 연평균 유출량이 실측 연평균 유출량에 비해 과소 추정되는 경향을 보였는데, 이는 무강우 시 기저유출량이 실측값에 비하여 과소 모의되었기 때문으로 기저유출량 모의에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

<표 3-1-10> 유역별 회귀식 적용 결과

Statistics	Watershed	Soyangang	Hoengseong	Chungju	Andong	Imha
Ratio ¹⁾		0.77	1.12	0.77	0.97	0.72
RMSE (mm/day)		3.95	3.10	3.78	3.57	2.63
R ²		0.73	0.82	0.74	0.75	0.81
NSE ²⁾		0.73	0.81	0.74	0.71	0.76
Statistics	Watershed	Hapcheon	Namgang	Milyang	Daecheong	Yongdam
Ratio ¹⁾		0.81	0.85	0.72	0.71	0.77
RMSE (mm/day)		2.45	4.86	3.95	2.58	2.62
R ²		0.87	0.83	0.85	0.82	0.86
NSE ²⁾		0.85	0.78	0.80	0.79	0.84
Statistics	Watershed	Boryung	Buan	Seomjingang	Juam	Tamjin
Ratio ¹⁾		0.79	0.73	0.79	1.22	0.90
RMSE (mm/day)		3.85	4.95	3.74	3.08	3.94
R ²		0.78	0.83	0.86	0.82	0.78
NSE ²⁾		0.77	0.77	0.78	0.81	0.78
Statistics	Watershed	Maeil	Yeongweol	Socheon	Shinan	Jisan
Ratio ¹⁾		0.48	0.71	0.96	1.24	1.26
RMSE (mm/day)		4.09	2.19	2.69	3.65	2.32
R ²		0.79	0.85	0.62	0.85	0.84
NSE ²⁾		0.79	0.84	0.60	0.80	0.83
Statistics	Watershed	Hyoryeong	Gajang	Okcheon	Cheoncheon	Songcheon
Ratio ¹⁾		0.62	0.96	1.25	1.02	1.14
RMSE (mm/day)		4.50	2.21	1.55	2.68	2.57
R ²		0.75	0.78	0.74	0.86	0.75
NSE ²⁾		0.72	0.77	0.74	0.84	0.75
Statistics	Watershed	Gidaegyo	Jangjeon	Neungju	Mareuk	Eudeong
Ratio ¹⁾		0.75	1.35	0.79	0.72	0.71
RMSE (mm/day)		3.20	0.70	3.39	2.22	3.71
R ²		0.80	0.77	0.78	0.75	0.83
NSE ²⁾		0.79	0.74	0.75	0.70	0.78

1) Ratio: (Simulated runoff) ÷ (Observed runoff)

2) NSE: Nash-Sutcliffe Model Efficiency



(그림 3-1-9) 회귀식에 의한 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치의 산포도

(3) 유역경사 구간에 대한 지역화식 개발

기존에 개발된 지역화식은 일부 유역의 강우-유출량 자료만을 이용하여 일반화된 하나의 지역화식을 개발하였고, 이는 정확한 유출량을 모의하기에는 한계가 있다고 사료되어 유출량에 영향을 미치는 특정 유역특성인자를 고려하여 세분화된 지역화식을 개발하였다.

Tank 모형의 매개변수를 살펴보면 1단 탱크 유출공의 유출계수 A11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총 유출량 또한 증가하게 된다. A11과 마찬가지로 A12 또한 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 많아지고 총 유출량 또한 증가하게 된다. 2단 탱크 유출공의 유출계수인 A2는 중간유출과 관련이 있는 부분으로서, A2의 값이 커짐에 따라 3단 탱크의 유입보다 측벽 유출공을 통한 유출이 많아지므로 중간유출량이 증가하게 된다. 3단 탱크 유출공의 유출계수 A3는 유출량에 가장 낮은 민감도를 나타낸다. 또한, 1단 탱크 침투공의 침투계수인 B1은 그 값이 커짐에 따라 2단 탱크로의 유입이 많아지고, 측 유출공의 유출량이 적어지므로 총 유출량은 감소하게 된다. 반면에, 침투계수가 작을수록 2단 탱크로의 유입이 적고 측 유출공의 유출량이 많아져서 총 유출량은 증가하게 된다. B2, B3는 유출량에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 1단 탱크 아래쪽 유출공의 높이를 나타내는 H11은 값이 커짐에 따라 유출공을 통한 유출량이 적어지므로 총 유출량 또한 감소하게 된다. H12는 저수 시 보다 홍수 시 유출량에 영향을 많이 미치는데, 이는 H12의 높이가 1단 탱크의 유출공 중에서 가장 높아 적은 양의 강우로는 H12의 높이를 채울 수 없기 때문으로 사료된다.

<표 3-1-9>에서 제시된 지역화식에서 유출량 추정 시 민감한 변수 A11, A12, B1, H11 및 H12 등은 공통적으로 유역경사와 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 김종건 등 (2007)은 유역특성인자 중 유역경사가 유역의 유출특성에 가장 많은 영향을 미친다고 보고한 바 있다.

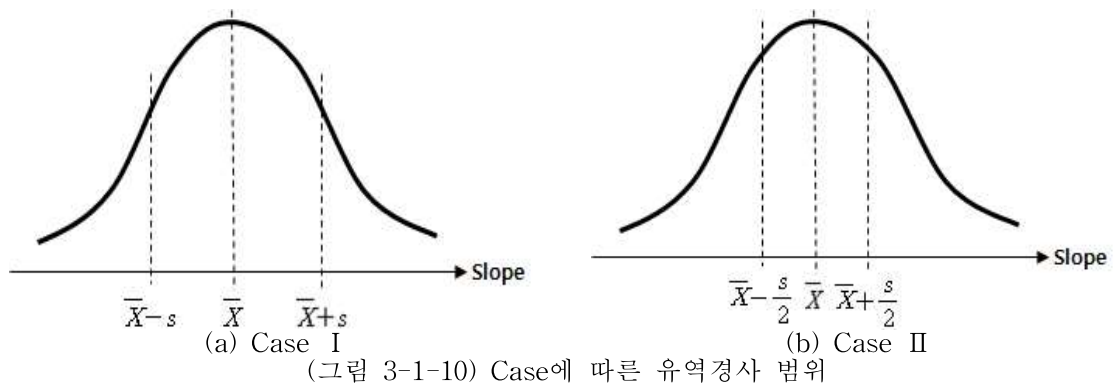
따라서 유역특성인자 중 유역경사를 이용하여 세분화된 지역화식을 개발하고자 하였고, 국내 유역경사의 분포현황을 파악하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 국내 표준유역, 단위유역 및 주요지점유역의 유역경사에 대한 최소, 최대, 평균값을 <표 3-1-11>에 나타내었다. 표준유역에서의 평균 유역경사는 28.79%, 단위유역의 평균 유역경사는 27.95%, 주요지점유역의 평균 유역경사는 33.34%로 나타났으며, 국내 전체 유역의 평균경사는 28.97%로 산정되었다.

본 연구에서 대상유역으로 선정된 총 30개의 유역경사는 14.96% ~ 41.65%로 크게 분포되어 있고, 평균유역경사는 28.2%로 국내 전체 유역의 평균경사와 유사하게 나타났으며 표준편차는 6.4로 산정되었다.

<표 3-1-11> 국내 표준유역, 단위유역 및 주요지점 유역의 유역경사

	Standard basin	Unit basin	Major control points basin
	Slope (%)		
Min	1.92	4.51	6.49
Max	58.51	58.51	50.12
Average	28.79	27.95	33.34
	Global average		28.97

본 연구에서는 평균유역경사 (\bar{X}) 28.2%를 기준으로 전체 유역경사를 (그림 3-1-10)의 Case I, Case II와 같이 경사 구간을 구분하고, 각 구간에 대한 지역화식을 개발하였다. 또한, 개발된 지역화식으로 매개변수를 산정한 뒤 Tank 모형에 적용하여 모의된 유출량과 실측 유출량을 비교함으로써 지역화식을 검증하였다.



① Case I : 유역경사 구간에 대한 지역화식 개발 및 검증

(그림 3-1-10)의 Case I 과 같이 평균 (\bar{X})과 표준편차 (s)를 이용하여 유역경사(S)를 $S \leq 21.8\%$, $21.8\% < S < 34.5\%$, $S \geq 34.5\%$ 로 구분하고, 각 경사 구간에 대한 지역화식을 개발하여 <표 3-1-12>에 나타내었다.

<표 3-1-12>의 각 경사 구간에 대한 지역화식으로 산정된 모형의 매개변수를 Tank 모형에 적용하여 유출량 모의결과를 비교·검증하였으며, 그 통계적 결과를 <표 3-1-13>에 나타내었다. (그림 3-1-11)은 각 범위에 해당하는 유역을 대표적으로 하나

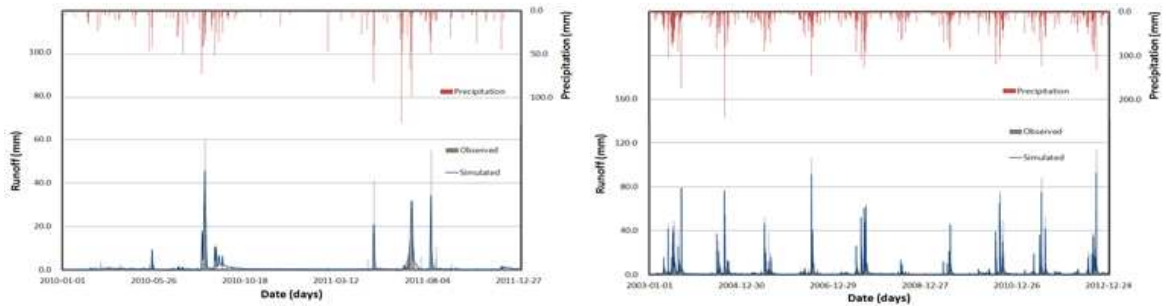
씩 선정하여 모의 유출량과 실측 유출량을 비교하여 도시한 것이다. 또한, 총 30개 유역을 대상으로 모의한 연평균 유출량을 실측 연평균 유출량과 비교하여 (그림 3-1-12)에 나타내었다. 모든 유역에서 R^2 와 효율지수가 0.7 이상으로 높은 적합도를 보였다. 매일 수위 관측소 유역의 경우 모의된 유출량과 실측 유출량의 비율이 현저히 낮는데, 이는 밭 비율의 영향으로 사료된다. 1단 탱크 침투공 계수는 밭 비율의 영향을 받는데, 매일 수위 관측소 유역은 타 유역에 비해 밭이 적게 분포되어 있고 이로 인하여 1단 탱크 침투공 계수가 크게 산정되었다. 침투공 계수가 높을 경우 총유출량은 감소하는 경향을 보이는데, 이로 인하여 매일 수위 관측소 유역의 유출량이 과소 모의된 것으로 보인다.

<표 3-1-12> 개발된 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case I)

	Parameters	Regression equation
$S \leq 21.8\%$	A11	$-0.01Slope + 0.062\ln(Upland) + 0.062\ln(Area) - 0.112$
	A12	$0.077Paddy + 0.05Forest - 0.109\ln(Slope) - 4.426$
	A2	$0.001Paddy + 0.121\ln(Forest) + 0.064\ln(Slope) - 0.627$
	A3	$-0.000294Upland + 0.002\ln(Area) - 0.004\ln(Length) + 0.011$
	B1	$0.001Slope - 0.005\ln(Upland) + 0.092$
	B2	$-0.017\ln(Area) + 0.121$
	B3	$0.000102Paddy + 0.000069Forest - 0.001$
	H11	$0.463Forest + 6.045Slope - 102.145$
	H12	$0.01Area + 2.233Slope + 9.858$
	H2	$0.621Forest + 26.086\ln(Upland) - 58.446$
St3	$-1.323Forest + 135.142$	
$21.8\% < S < 34.5\%$	A11	$-0.01Slope - 0.11\ln(Upland) - 0.011\ln(Area) + 0.702$
	A12	$0.003Paddy + 0.001Forest + 0.054\ln(Slope) + 0.071$
	A2	$0.000275Paddy - 0.02\ln(Forest) + 0.035\ln(Slope) + 0.06$
	A3	$0.0000046Upland + 0.00027\ln(Area) + 0.00026\ln(Length) + 0.004$
	B1	$-0.009Slope - 0.124\ln(Upland) + 0.634$
	B2	$-0.006\ln(Area) + 0.076$
	B3	$0.000068Paddy + 0.000112Forest - 0.002$
	H11	$0.407Forest - 0.709Slope + 19.981$
	H12	$-0.002Area - 0.042Slope + 60.101$
	H2	$0.621Forest + 15.083\ln(Upland) - 36.896$
St3	$1.091Forest - 39.039$	
$S \geq 34.5\%$	A11	$-0.017Slope + 0.09\ln(Upland) - 0.02\ln(Area) + 0.944$
	A12	$0.013Paddy - 0.001Forest + 1.85\ln(Slope) - 6.329$
	A2	$0.001Paddy + 0.09\ln(Forest) + 0.007\ln(Slope) - 0.335$
	A3	$-0.001Upland + 0.002\ln(Area) - 0.004\ln(Length) + 0.016$
	B1	$0.012Slope - 0.069\ln(Upland) - 0.207$
	B2	$-0.015\ln(Area) + 0.134$
	B3	$0.000292Paddy + 0.00008Forest - 0.002$
	H11	$1.274Forest - 1.841Slope - 4.543$
	H12	$0.01Area + 0.518Slope + 37.53$
	H2	$-1.387Forest - 1.408\ln(Upland) + 146.071$
St3	$-0.199Forest + 71.218$	

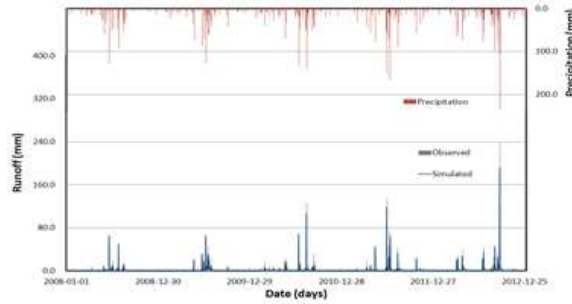
<표 3-1-13> 유역별 매개변수 지역화식 적용결과 (Case I)

$S \leq 21.8\%$	Statistics	Watershed	Hyoryeong	Mareuk	Eudeong	Gajang
	Ratio		0.67	0.73	0.79	0.85
	RMSE (mm/day)		4.48	2.18	3.93	2.19
	R ²		0.79	0.76	0.76	0.81
	NSE		0.75	0.71	0.75	0.78
$21.8\% < S < 34.5\%$	Statistics	Watershed	Seomjingang	Gidaegyo	Hapcheon	Chungju
	Ratio		0.75	0.75	0.77	0.70
	RMSE (mm/day)		3.72	3.18	2.50	3.83
	R ²		0.85	0.80	0.86	0.75
	NSE		0.79	0.80	0.85	0.73
$21.8\% < S < 34.5\%$	Statistics	Watershed	Juam	Shinan	Neungju	Daecheong
	Ratio		1.16	1.15	0.78	0.70
	RMSE (mm/day)		3.07	3.60	3.31	2.56
	R ²		0.82	0.86	0.78	0.82
	NSE		0.81	0.81	0.76	0.80
$21.8\% < S < 34.5\%$	Statistics	Watershed	Cheoncheon	Yongdam	Tamjin	Jangjeon
	Ratio		0.95	0.74	0.86	1.21
	RMSE (mm/day)		2.47	2.45	3.82	0.64
	R ²		0.88	0.90	0.80	0.79
	NSE		0.88	0.88	0.79	0.78
$21.8\% < S < 34.5\%$	Statistics	Watershed	Okcheon	Namgang	Jisan	Boryung
	Ratio		1.34	0.82	1.25	0.75
	RMSE (mm/day)		1.41	4.70	2.32	3.90
	R ²		0.79	0.82	0.84	0.79
	NSE		0.78	0.80	0.83	0.76
$21.8\% < S < 34.5\%$	Statistics	Watershed	Andong	Imha	Hoengseong	Maeil
	Ratio		0.93	0.70	1.11	0.50
	RMSE (mm/day)		3.40	2.53	2.86	4.01
	R ²		0.71	0.80	0.85	0.80
	NSE		0.70	0.78	0.84	0.80
$S \geq 34.5\%$	Statistics	Watershed	Songcheon	Buan	Yeongweol	Soyangang
	Ratio		0.88	0.85	0.71	0.84
	RMSE (mm/day)		2.38	3.95	2.19	3.69
	R ²		0.81	0.86	0.85	0.76
	NSE		0.79	0.85	0.84	0.76
$S \geq 34.5\%$	Statistics	Watershed	Socheon	Milyang		
	Ratio		1.00	0.75		
	RMSE (mm/day)		2.44	3.38		
	R ²		0.70	0.87		
	NSE		0.70	0.86		



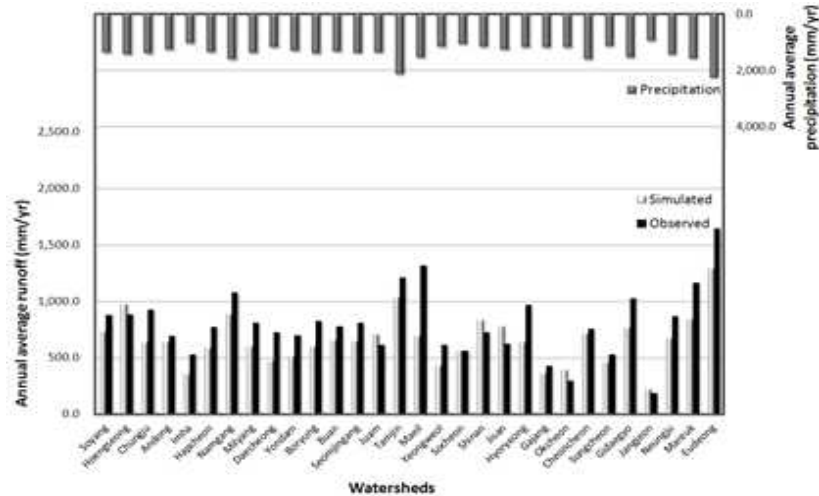
(a) Gajang watershed ($S \leq 21.8\%$)

(b) Hapcheon watershed ($21.8\% < S < 34.5\%$)



(c) Milyang watershed ($S \geq 34.5\%$)

(그림 3-1-11) 유역경사에 따른 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case I)



(그림 3-1-12) 유역별 연평균 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case I)

② Case II: 유역경사 구간에 대한 지역화식 개발 및 검증

Case I 은 평균 부분을 제외한 양 끝의 표본 수가 너무 적어 (그림 3-1-10)의 Case II와 같이 \bar{X} 와 $s/2$ 를 이용하여 유역경사(S)를 $S \leq 25.0\%$, $25.0\% < S < 31.4\%$, $S \geq 31.4\%$ 로 구분하고, 각 경사 구간에 대한 지역화식을 개발하여 <표 3-1-14>에 나타내었다.

<표 3-1-14>의 각 경사 구간에 대한 지역화식으로 산정된 모형의 매개변수를 Tank 모형에 적용하여 유출량 모의결과를 비교·검증하였으며, 그 통계적 결과를 <표 3-1-15>에 나타내었다. (그림 3-1-13)은 각 구간에 해당하는 유역을 대표적으로 하나씩 선정하여 모의 유출량과 실측 유출량을 비교하여 도시한 것이다. 또한, 총 30개 유

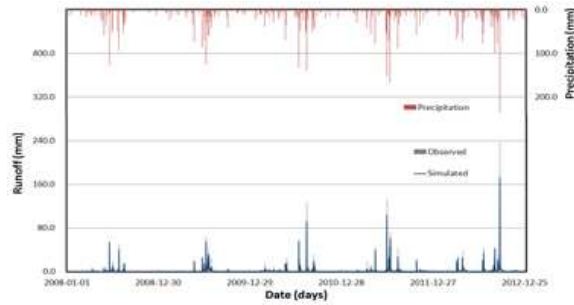
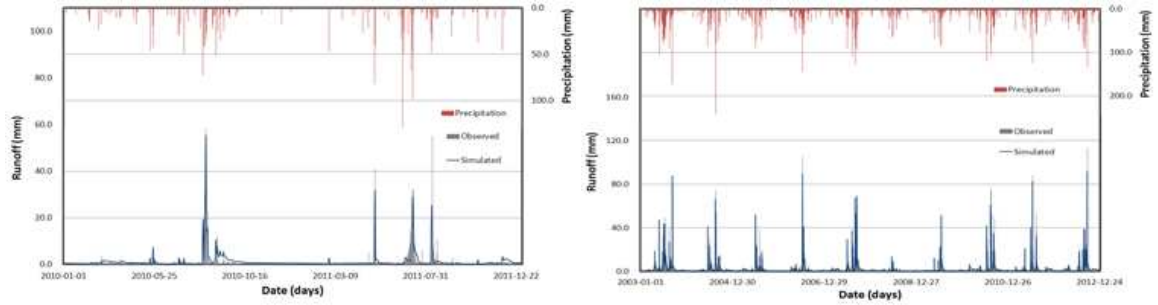
역을 대상으로 모의한 연평균 유출량을 실측 연평균 유출량과 비교하여 (그림 3-1-14)에 나타내었다. 모든 유역에서 R^2 와 효율지수가 0.7 이상으로 높은 적합도를 보였다. 통계적 결과를 비교해보았을 때 Case I 과 Case II의 R^2 , 효율지수 등은 유사하게 나타났으나, RMSE 값은 Case I에 비해 다소 낮은 값을 보였다. 이는 Case II로 개발된 지역화식으로 매개변수를 산정하고 이를 Tank 모형에 적용하여 모의된 총 유출량이 실측 총 유출량에 좀 더 근접하게 모의되었고, 이러한 결과가 RMSE 값을 낮추는데 영향을 미친 것으로 보인다.

<표 3-1-14> 개발된 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case II)

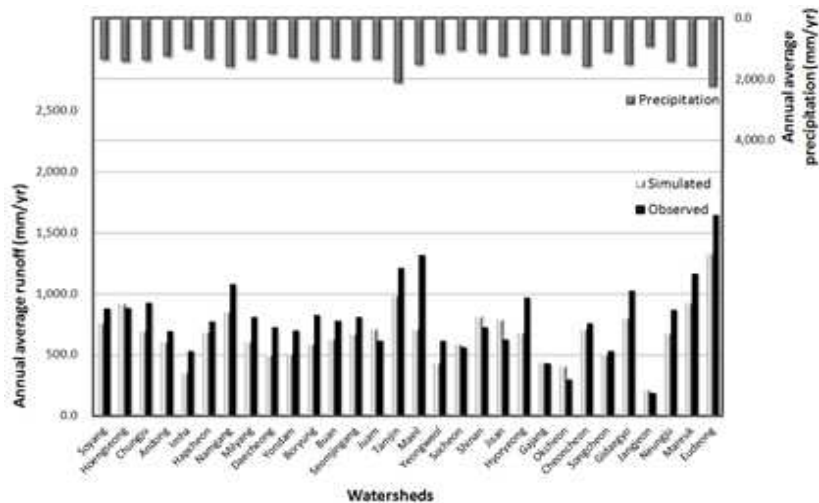
	Parameters	Regression equation
$S \leq 25.0\%$	A11	$0.006Slope - 0.026\ln(Upland) - 0.006\ln(Area) + 0.147$
	A12	$0.032Paddy + 0.024Forest + 0.669\ln(Slope) - 3.889$
	A2	$0.003Paddy + 0.173\ln(Forest) + 0.034\ln(Slope) - 0.792$
	A3	$-0.000209Upland + 0.005\ln(Area) - 0.007\ln(Length) + 0.008$
	B1	$0.005Slope + 0.064\ln(Upland) - 0.079$
	B2	$-0.004\ln(Area) + 0.049$
	B3	$-0.000106Paddy - 0.00006Forest + 0.013$
	H11	$-0.173Forest + 0.648Slope + 30.316$
	H12	$-0.001Area + 1.169Slope + 32.089$
	H2	$0.606Forest + 27.512\ln(Upland) - 60.507$
	St3	$-0.718Forest + 100.552$
$25.0\% < S < 31.4\%$	A11	$-0.009Slope - 0.025\ln(Upland) - 0.016\ln(Area) + 0.554$
	A12	$-0.01Paddy + 0.013Forest - 0.426\ln(Slope) + 0.819$
	A2	$-0.00003Paddy + 0.000335\ln(Forest) + 0.025\ln(Slope) + 0.008$
	A3	$-0.000077Upland + 0.00024\ln(Area) + 0.00046\ln(Length) + 0.004$
	B1	$-0.003Slope - 0.133\ln(Upland) + 0.475$
	B2	$-0.008\ln(Area) + 0.095$
	B3	$-0.000025Paddy + 0.000247Forest - 0.012$
	H11	$1.317Forest - 2.091Slope - 12.784$
	H12	$-0.004Area + 0.587Slope + 44.273$
	H2	$0.592Forest + 1.201\ln(Upland) - 8.915$
	St3	$1.118Forest - 43.578$
$S \geq 31.4\%$	A11	$-0.034Slope + 0.065\ln(Upland) - 0.035\ln(Area) + 1.694$
	A12	$0.011Paddy + 0.003Forest + 1.109\ln(Slope) - 3.963$
	A2	$0.001Paddy + 0.081\ln(Forest) + 0.027\ln(Slope) - 0.369$
	A3	$-0.000294Upland - 0.002\ln(Area) + 0.004\ln(Length) + 0.005$
	B1	$-0.006Slope - 0.086\ln(Upland) + 0.506$
	B2	$-0.013\ln(Area) + 0.112$
	B3	$0.000323Paddy + 0.000103Forest - 0.004$
	H11	$0.924Forest - 0.374Slope - 31.299$
	H12	$0.001Area + 0.115Slope + 53.262$
	H2	$-1.533Forest + 2.135\ln(Upland) + 153.058$
	St3	$0.076Forest + 49.761$

<표 3-1-15> 유역별 매개변수 지역화식 적용결과 (Case II)

$S \leq 25.0\%$	Statistics	Watershed	Hyoryeong	Mareuk	Eudeong	Gajang
	Ratio		0.62	0.79	0.81	1.03
	RMSE (mm/day)		4.72	2.26	3.79	2.05
	R ²		0.83	0.85	0.78	0.83
	NSE		0.78	0.81	0.77	0.80
$25.0\% < S < 31.4\%$	Statistics	Watershed	Seomjingang	Gidaegyo	Hapcheon	Chungju
	Ratio		0.83	0.79	0.89	0.76
	RMSE (mm/day)		3.70	2.95	2.51	3.98
	R ²		0.86	0.83	0.85	0.71
	NSE		0.79	0.82	0.85	0.71
$25.0\% < S < 31.4\%$	Statistics	Watershed	Juam	Shinan	Neungju	Daecheong
	Ratio		1.16	1.13	0.78	0.70
	RMSE (mm/day)		3.07	3.60	3.25	2.54
	R ²		0.82	0.87	0.80	0.82
	NSE		0.81	0.82	0.77	0.80
$25.0\% < S < 31.4\%$	Statistics	Watershed	Cheoncheon	Yongdam	Tamjin	Jangjeon
	Ratio		0.94	0.73	0.81	1.13
	RMSE (mm/day)		2.44	2.46	3.71	0.64
	R ²		0.89	0.91	0.81	0.80
	NSE		0.88	0.88	0.80	0.79
$25.0\% < S < 31.4\%$	Statistics	Watershed	Okcheon	Namgang	Jisan	Boryung
	Ratio		1.37	0.79	1.27	0.71
	RMSE (mm/day)		1.51	4.75	2.31	3.79
	R ²		0.76	0.87	0.84	0.82
	NSE		0.75	0.80	0.83	0.78
$25.0\% < S < 31.4\%$	Statistics	Watershed	Andong	Imha	Hoengseong	
	Ratio		0.88	0.71	1.04	
	RMSE (mm/day)		3.40	2.55	2.85	
	R ²		0.70	0.83	0.84	
	NSE		0.70	0.79	0.84	
$S \geq 31.4\%$	Statistics	Watershed	Maeil	Songcheon	Buan	Yeongweol
	Ratio		0.50	0.96	0.81	0.71
	RMSE (mm/day)		3.66	2.35	3.82	2.19
	R ²		0.83	0.80	0.88	0.85
	NSE		0.83	0.79	0.86	0.84
$S \geq 31.4\%$	Statistics	Watershed	Soyangang	Socheon	Milyang	
	Ratio		0.86	1.05	0.76	
	RMSE (mm/day)		3.63	2.21	3.36	
	R ²		0.77	0.72	0.89	
	NSE		0.77	0.72	0.86	



(그림 3-1-13) 유역경사에 따른 유출량 모의치와 실측치 비교 (Case II)



3.2. Tank 모형의 매개변수 추정 지역화식 적용성 평가

본 연구에서 개발된 매개변수 지역화식의 적용성 평가를 위해 기존에 개발된 지역화식을 이용하여 유출량을 모의하고, 실측치와의 통계적 변량과 도시적 방법을 통해 미계측 유역에서의 적용성을 평가하고자 한다. 대상유역은 4개의 댐유역 (밀양, 용담, 횡성, 보령)을 대상유역으로 선정하였으며 적용기간은 2010 ~ 2012년으로 하였다. <표 3-1-16>은 대상유역의 유역면적, 유로장, 유역경사를 나타낸다.

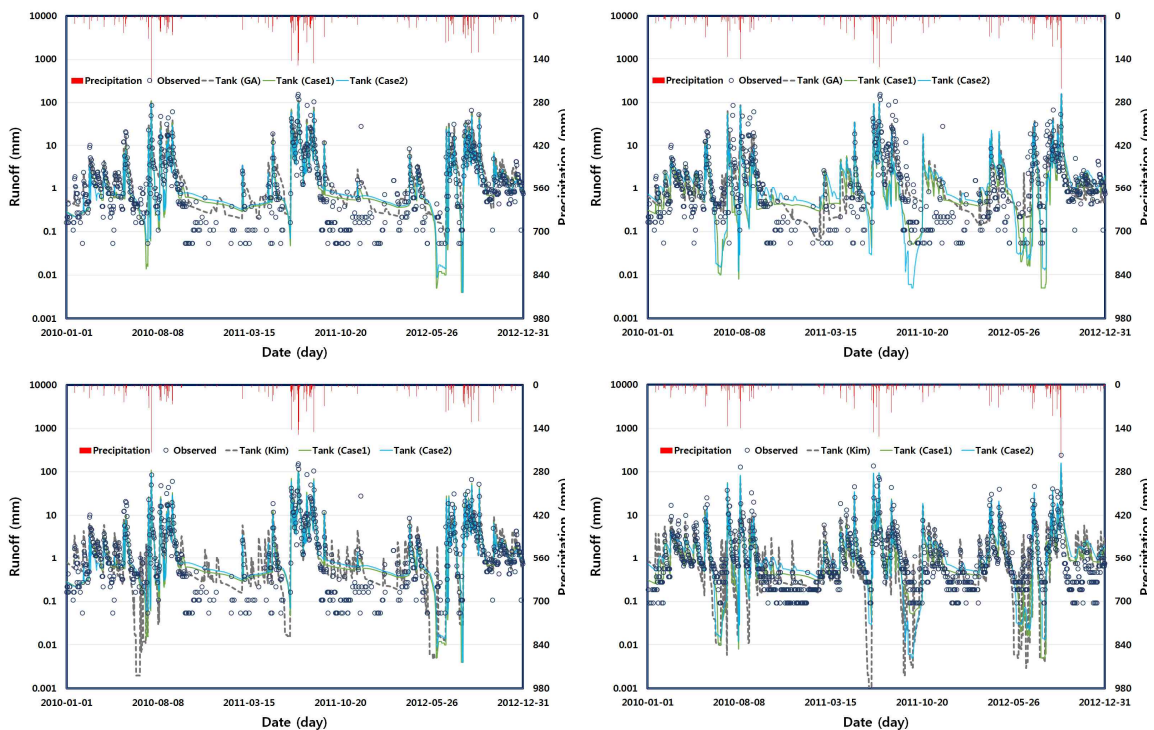
<표 3-1-16> 대상유역의 면적, 유로장, 유역경사

대상유역	유역면적 (km ²)	유로장 (km)	유역경사 (%)
보령댐	161.59	22.30	30.05
밀양댐	93.98	28.06	41.65
횡성댐	207.88	28.71	30.69
용담댐	922.62	62.60	27.52

<표 3-1-17>은 모형별 통계적 지표를 나타낸 표이며, (그림 3-1-15)는 모형별 유출량을 나타내고 있다. 모의결과 최적화 기법에 의해 보정된 매개변수를 사용하였을 때 R^2 는 0.74 ~ 0.89, RMSE는 3.00 ~ 5.54 mm, NSE는 0.73 ~ 0.87의 범위로 나타나 모든 유역에서 가장 실측치와 유사한 것으로 나타났다. 한편, 김현영과 박승우 (1988)의 매개변수 지역화식을 이용하여 모의한 결과 R^2 는 0.72 ~ 0.88, RMSE는 3.38 ~ 6.26 mm, NSE는 0.67 ~ 0.84의 범위로 나타났으며, 개발된 매개변수 지역화식을 이용하여 모의한 결과 Case I 은 R^2 는 0.71 ~ 0.87, RMSE는 3.74 ~ 5.91 mm, NSE는 0.70 ~ 0.79의 범위로, Case II는 R^2 는 0.68 ~ 0.87, RMSE는 3.36 ~ 6.01 mm, NSE는 0.66 ~ 0.84의 범위로 나타났다. 유역별로 모의능력은 차이를 보였으나 대체로 기존의 매개변수 지역화식과 유사한 결과로 나타나 지역화식의 적용성에 있어 타당성이 있을 것으로 사료된다.

<표 3-1-17> 실측치와 모의치의 통계적 변량

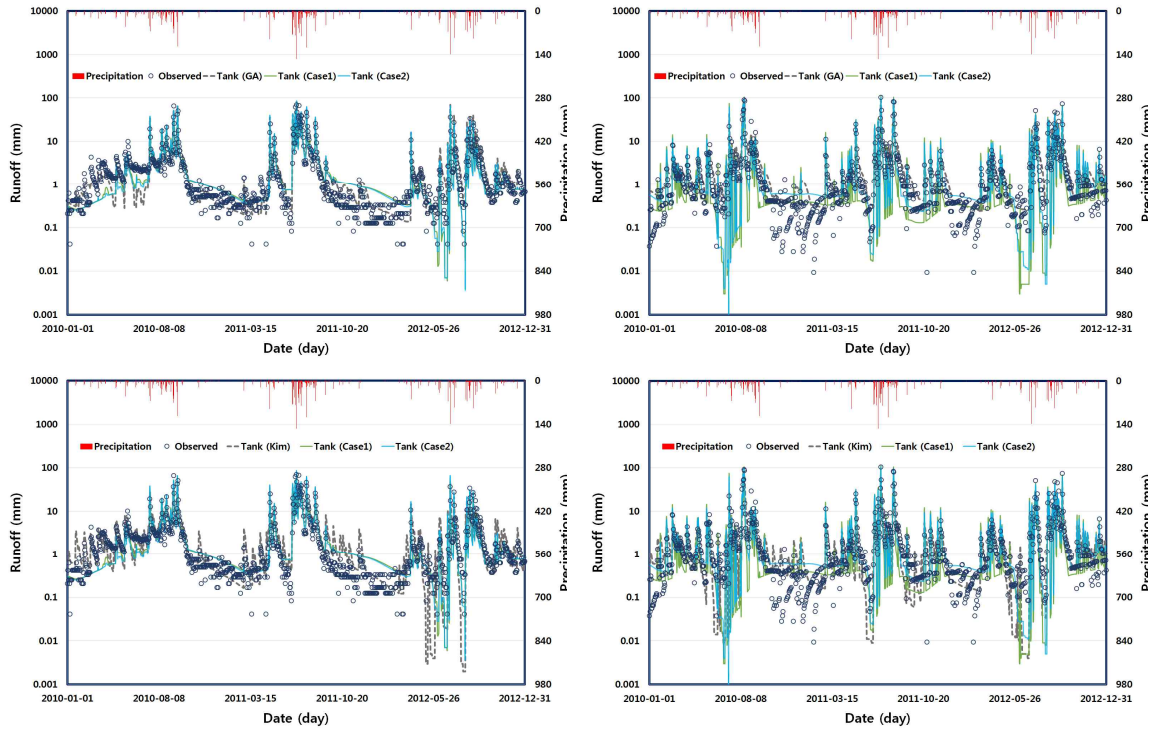
유역	통계적 변량	Tank			
		GA	Kim	Ahn (Case1)	Ahn (Case2)
보령댐	R^2	0.74	0.72	0.71	0.73
	RMSE (mm)	5.54	6.11	5.91	6.01
	NSE	0.73	0.68	0.70	0.69
밀양댐	R^2	0.86	0.78	0.87	0.87
	RMSE (mm)	4.84	6.26	5.03	4.60
	NSE	0.80	0.67	0.79	0.82
횡성댐	R^2	0.74	0.76	0.71	0.68
	RMSE (mm)	3.61	3.38	3.74	4.02
	NSE	0.73	0.76	0.71	0.66
용담댐	R^2	0.89	0.88	0.80	0.84
	RMSE (mm)	3.00	3.57	3.91	3.36
	NSE	0.87	0.82	0.78	0.84



(a) 보령댐 유역

(b) 밀양댐 유역

(그림 3-1-15) 유역별 모형 모의능력 비교



(a) 횡성댐 유역 (b) 용담댐 유역
 (그림 3-1-15) 유역별 모형 모의능력 비교 (계속)

<표 3-1-18>은 모형별 연평균 유출량을 나타낸다. 연평균 유출량의 경우 GA를 이용하여 매개변수 보정을 거친 Tank 모형은 76 ~ 106%, 김현영과 박승우 (1988)의 매개변수 지역화식을 이용할 경우 78 ~ 105%의 범위에서 모의되었다. 유역경사에 따른 매개변수 지역화식을 적용할 경우 Case I 은 63% ~ 88%, Case II는 72% ~ 86%의 범위에서 모의되었다. 대부분 실측치와 근접한 범위 내에서 모의되었으나 유역에 따라 오차의 편차가 크게 나타났다. 개발된 매개변수 지역화식은 Case I 과 Case II 모두 과소모의 되는 경향을 보였다. 두 경우 모두 기저유출시에 실측치보다 과다모의 되는 경향을 보였으며 Case II의 오차가 더 크게 나타났다. 홍수기 유출에서는 실측치에 비해 과소모의 되는 경향을 보였다. 이로 인해 연평균 유출량에서의 과소모의가 된 것으로 사료된다.

<표 3-1-18> 연평균 유출량 모의치와 실측치 비교

Watershed	Observed (mm/yr)	Tank (mm/yr)			
		GA	Kim	Ahn (Case I)	Ahn (Case II)
Boryeong	1130.0	1132.7	1031.6	865.7	823.9
Miryang	996.1	866.6	883.1	713.3	846.9
Hoengseong	1041.0	1188.9	1177.3	994.5	966.7
Yongdam	1001.5	1013.7	963.2	873.7	909.9

3.3. Tank 모형과 SWAT 모형의 적용 결과 비교 및 평가

유출량 계측 자료가 보유한 지역의 경우 집중형 및 분포형 모형은 유출량 모의 과정

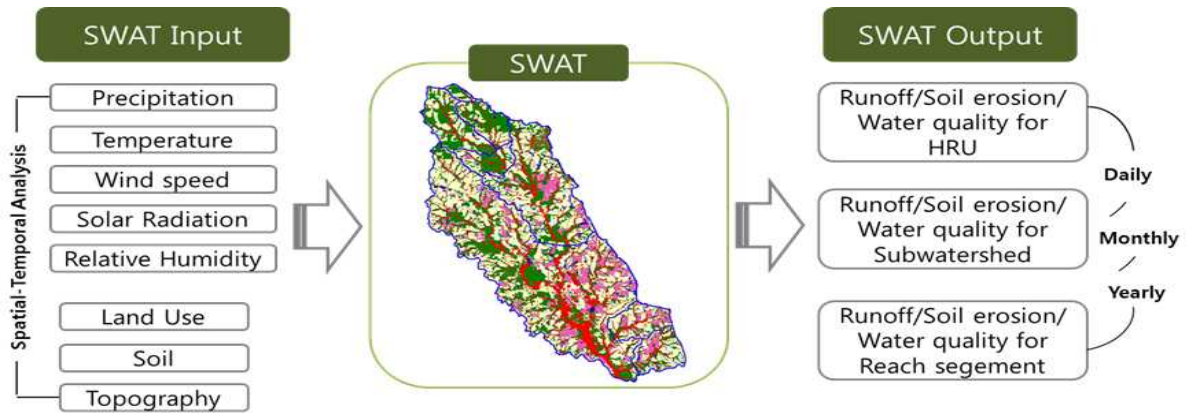
에서 실측 자료와 비교하여 매개변수를 최적화하는 보정과정을 거치는 것이 일반적이다. SWAT 모형의 경우도 보정 과정을 거치게 되는데, 그 과정에서 유역의 물리적 특성을 고려하여 산정된 초기 매개변수는 목적함수를 만족하는 값으로 변하게 된다. 이는 유출량 예측 지역에 대해 SWAT 모형을 적용할 경우 매개변수의 물리적 특성을 고려하여 유출량을 모의할 수 있는 장점에서 벗어나게 된다. 따라서 유출량이 예측된 지역에 대해 수문 모형을 적용할 경우 Tank 모형과 SWAT 모형이 모의 능력이 비슷하다면, 적용이 편리한 Tank 모형이 추천될 수 있다. 국내에서는 SWAT-K 모형과 Tank 모형의 유출량 모의 능력을 비교하는 연구가 김철겸과 김남원 (2012)에 의해 수행된 바 있으나, SWAT 모형과 Tank 모형을 비교하는 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 Tank 모형과 SWAT 모형의 비교를 통한 Tank 모형의 적용성을 검토하기 위하여, 4개의 댐 유역을 대상으로 입력 자료를 구축하고, 최적화 기법을 이용하여 Tank 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 보정하여, SWAT 모형과 Tank 모형의 유출량을 비교하고 평가하고자 한다.

가. SWAT 모형

SWAT 모형은 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 유출량, 유사량의 모의 및 화학비료 등의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발되었다. SWAT은 CREAMS, GLEAMS, EPIC 모형을 기초로하여 개발되었으며, 현재의 SWAT 모형은 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins; 1987)을 발전시킨 형태이다.

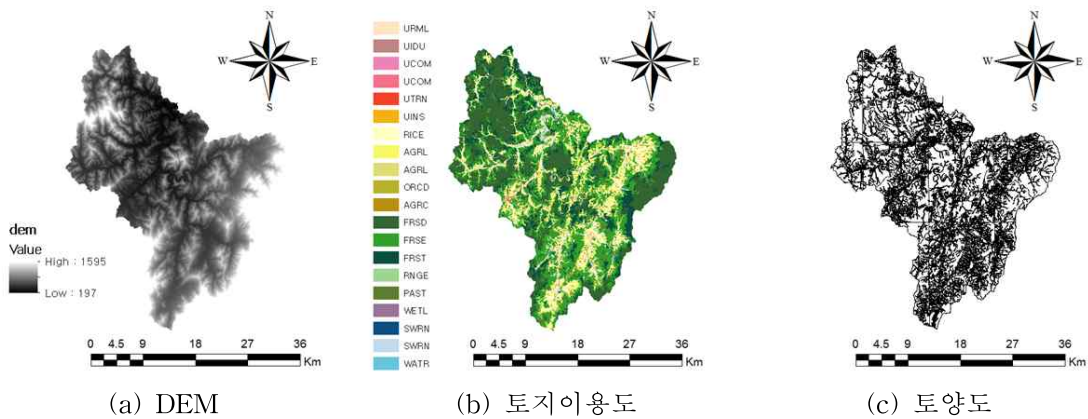
SWAT 모형은 유역의 지형특성을 고려하여 대상유역을 몇 개의 소유역 (subbasin)으로 나누고, 소유역을 토지이용 및 토양 특성에 따라 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화한다. 전체적인 모의는 유역부분과 수체부분으로 나누어 실시되는데 유역에서는 각 HRU에서 물수지식에 따라 강수량, 지하수로의 침투량, 증발산량 그리고 지표유출량을 산정한다. SWAT 모형에서 일별 지표면 유출량은 SCS 방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model (Sloan et al., 1983)을 이용하고 침투는 토층을 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한, 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다. 토양침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의하여 계산되며, 인, 질소와 살충제 같은 유기성 화학물질의 이동량을 모의할 수 있다. 수체는 하천과 저수지를 의미하며 이 모듈에서는 유량, 퇴적물, 영양염류 그리고 유기성 화학물질의 반응 등이 고려된다. SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분되며, 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와 유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다 (그림 3-1-16).



(그림 3-1-16) SWAT 모형의 구성

나. 대상유역 및 자료구축

대상유역은 ‘Tank 모형의 매개변수 추정 지역화식 적용성 평가’에 사용되었던 유역과 동일한 유역으로 선정하였다. 대상유역의 최저·최고 기온, 평균풍속, 일사량 등의 기상자료는 유역 내 인접한 기상관측소의 2005 ~ 2012년 자료를 이용하였으며, 유역의 강우량 및 유출량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 제공하는 동일 기간에 대한 자료를 이용하였다. 대상유역의 지형자료는 1/25000 국토지리정보원 수치지도와, 농촌진흥청의 1/25,000 정밀토양도를 이용하였다. 토지이용도는 환경부 (2007)의 중분류 토지피복지도를 재분류하여 구축된 자료를 이용하였다. (그림 3-1-17)는 대상유역을 대표하여 용담댐유역의 수치지도, 토지피복도, 토양도를 나타내었다.



(그림 3-1-17) 용담댐 유역의 지형자료

다. 모형의 보정

강우-유출 모형이 실제 수문현상을 제대로 모의하기 위해서는 모형의 매개변수들을 합리적으로 추정하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 최적화 방법을 이용하여 매개변수의 보정을 하였으며 Tank 모형의 매개변수는 유전자 알고리즘, SWAT 모형의 매개변수는 SCE-UA 방법을 이용하여 보정하였다. 매개변수 보정과 관련한 최적화 기법에 대한 설명은 [제 3 장 제 4 절]에 자세히 서술하였다.

(1) Tank 모형

유전자알고리즘을 이용하여 Tank 모형의 매개변수를 최적화 하였으며, 2007 ~ 2009년의 유출량 실측치를 이용하였다. <표 3-1-19>은 보정된 Tank 모형의 매개변수를 나타낸다.

<표 3-1-19> 대상유역별 Tank 모형 최적 매개변수

	보령댐	밀양댐	횡성댐	용담댐
A11	0.1831	0.2340	0.1086	0.1205
A12	0.3133	0.2815	0.3445	0.4438
A2	0.0966	0.0991	0.0985	0.0990
A3	0.0057	0.0077	0.0059	0.0089
B1	0.1005	0.1062	0.1031	0.1542
B2	0.0133	0.0137	0.0415	0.0184
B3	0.0076	0.0080	0.0055	0.0078
H11	32.5712	32.4006	12.7121	5.5855
H12	59.0741	58.8234	59.1190	57.6157
H2	7.8966	32.5049	13.3112	18.6523
ST3	95.2835	94.0645	22.0367	27.4022

<표 3-1-21>은 통계적 변량을 나타내고 있으며, (그림 3-1-18)는 유역별 유출량 모의결과를, (그림 3-1-19)은 유역별 실측치와 모의치의 산포도를 나타낸다. 보정결과 R^2 는 0.79 ~ 0.88의 범위를, RMSE는 1.93 ~ 2.75 mm의 범위를, NSE는 0.77 ~ 0.86의 범위로 나타났다. Tank 모형의 모의치는 일부 구간에 대해서 0.2 mm 이하로는 유출량이 모의되지 않아 과다 모의되는 경향이 나타났으나 (그림 3-1-18)와 (그림 3-1-19)을 통해 모의치가 실측치의 경향은 반영하고 있는 것으로 사료된다.

(2) SWAT 모형

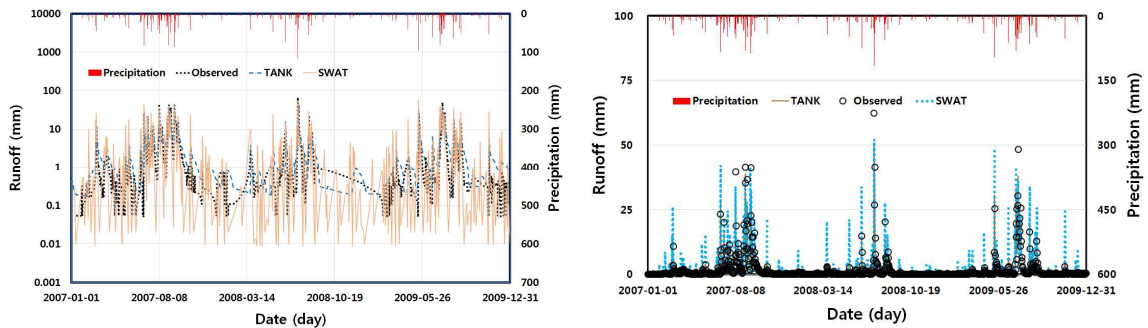
SWAT 모형의 보정은 Tank 모형에 적용한 자료와 동일한 자료를 이용하였다. 매개변수 자동보정 기법으로 SCE-UA기법을 사용하였으며, 자동보정을 위하여 ArcSWAT 내의 Parasol 프로그램을 이용하였다. 목적함수로 SSQ를 사용하였으며, 민감도 분석결과 유출에 대한 민감도가 비교적 큰 것으로 나타난 11개의 매개변수를 대상으로 자동보정을 실시하였다. <표 3-1-20>은 SWAT 모형의 매개변수 보정결과를, <표 3-1-21>은 보정결과를 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다. (그림 3-1-18)는 SWAT 모형의 유역별 유출량 모의결과를, (그림 3-1-19)은 유역별 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 보정기간에 대한 통계적 변량은 R^2 은 0.56 ~ 0.74, RMSE는 2.57 ~ 3.97 mm, NSE는 0.40 ~ 0.73의 범위로 나타나 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 통계적 변량이 더 좋은 결과로 나타났다. RMSE는 SWAT 모형이 Tank 모형에 비해 높게 나타내는데, 이는 SWAT 모형의 모의 유출량은 대체로 홍수기와 갈수기에 과소 모의되는 경향을 보였기 때문으로 사료된다. 하지만 (그림 3-1-18)와 (그림 3-1-19)을 통해 SWAT 모형의 모의치가 실측치의 경향은 반영하고 있는 것으로 사료된다.

<표 3-1-20> SWAT 모형의 유역별 최적 매개변수

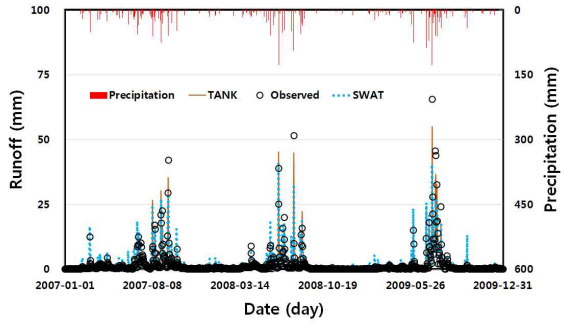
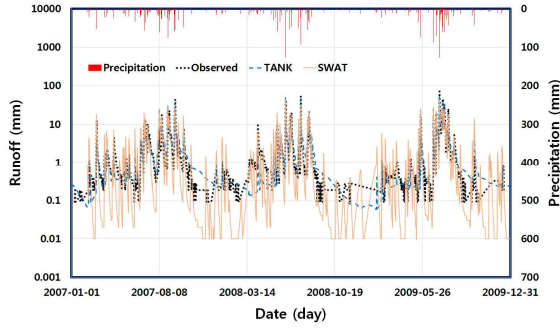
Parameter	Description	Range	Units	Calibrated Value			
				보령댐	밀양댐	횡성댐	용담댐
Parameters governing surface water response							
CN2	Moisture condition II curve number	30 ~ 100	none	49	44	42	54
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 ~ 1	none	0.1459	0.7299	0.4676	0.4778
SOL_AWC	Available water capacity	0 ~ 1	mm/mm	0.4571	0.1449	0.3905	0.1787
Parameters governing subsurface water response							
GW_REVAP	Revap coefficient	0.02 ~ 0.2	none	0.03868	0.1874	0.0645	0.04825
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap	0 ~ 500	mm H2O	61.020	440.45	196.14	276.08
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	0 ~ 5000	mm H2O	0.6664	1515.1	2160.9	4215.9
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	0 ~ 50	days	47.696	12.24	14.515	36.238
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0 ~ 1	days	0.0004	0.5879	0.6489	0.9947
RCHRG_DP	Aquifer percolation coefficient	0 ~ 1	fraction	0.2428	0.1996	0.8033	0.4489
Parameters governing basin response							
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0 ~ 24	days	0.8128	20.204	13.677	22.546
CH_K2	Effective hydraulic conductivity of channel	0.025 ~ 150	mm/hr	122.49	133.15	144.19	102.72

<표 3-1-21> 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 통계적 변량

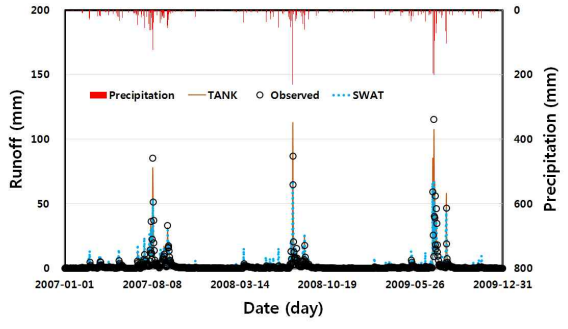
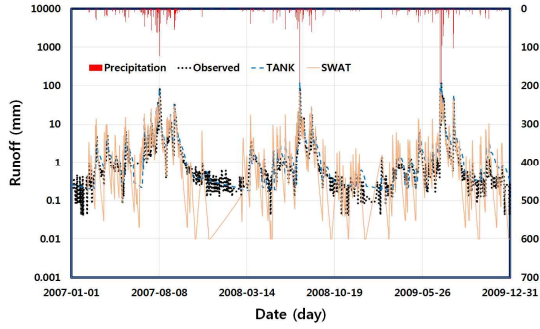
	Tank			SWAT		
	R ²	RMSE (mm)	NSE	R ²	RMSE (mm)	NSE
보령댐	0.79	2.43	0.77	0.56	3.97	0.4
밀양댐	0.82	2.01	0.82	0.71	2.57	0.71
횡성댐	0.88	2.75	0.86	0.74	3.79	0.73
용담댐	0.87	1.93	0.85	0.68	2.82	0.67



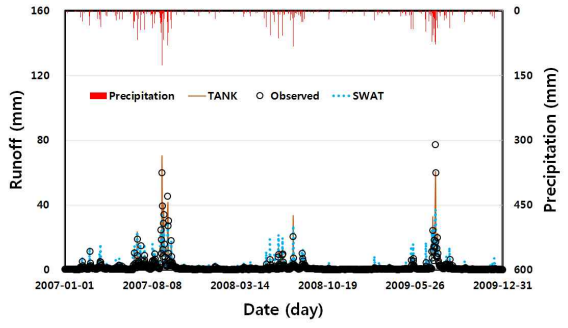
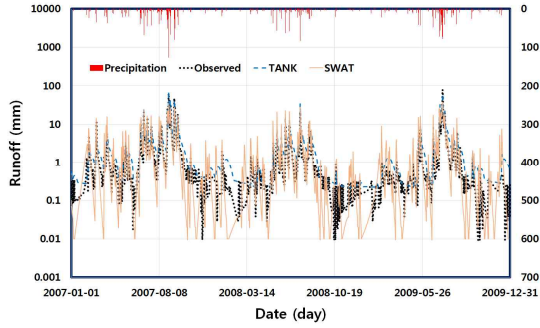
(a) 보령댐 유역
(그림 3-1-18) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유출량 비교



(b) 밀양댐 유역

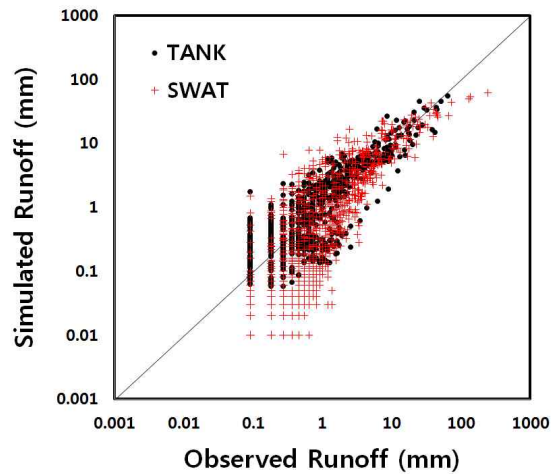
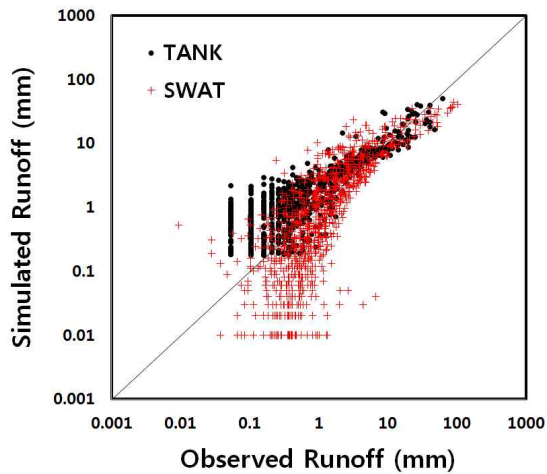


(c) 횡성댐 유역



(d) 용담댐 유역

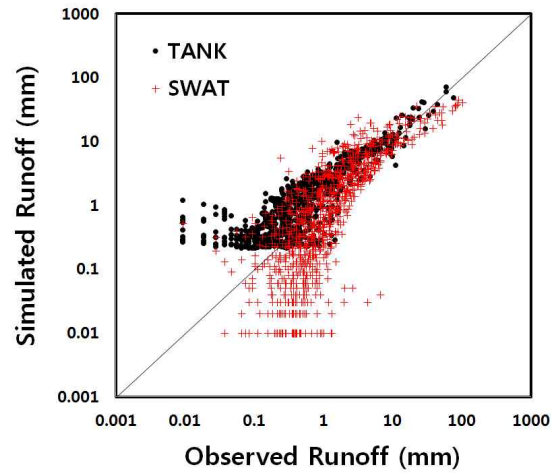
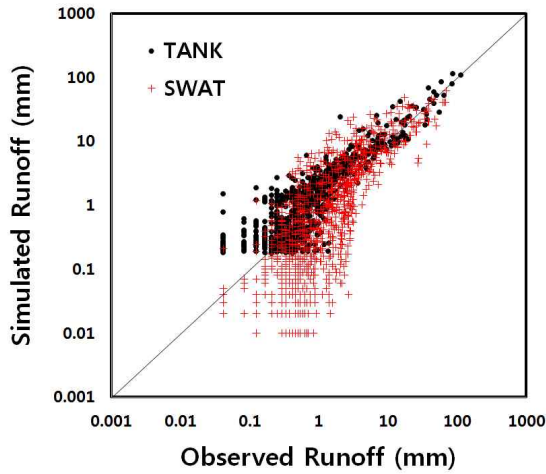
(그림 3-1-18) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유출량 비교 (계속)



(a) 보령댐 유역

(b) 밀양댐 유역

(그림 3-1-19) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유역별 산포도



(c) 황성담 유역 (d) 용담담 유역
(그림 3-1-19) 보정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유역별 산포도 (계속)

라. 모형의 검정

(1) Tank 모형

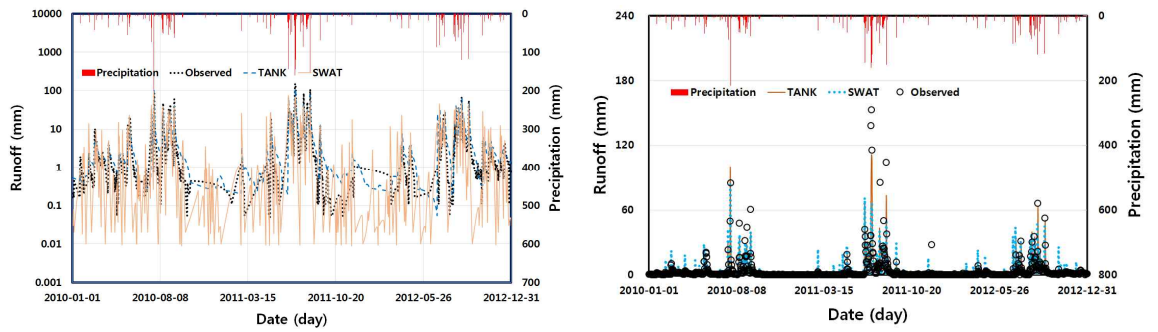
유전자 알고리즘에 의해 보정된 매개변수를 이용하여 모의하고 2010 ~ 2012년의 실측자료로 검정하였다. <표 3-1-22>은 통계적 변량을, (그림 3-1-20)은 유출량 모의결과를, (그림 3-1-21)은 실측치와 모의치의 산포도를 나타낸다. 검정결과 R^2 는 0.74 ~ 0.90, RMSE는 2.70 ~ 5.46 mm, NSE는 0.74 ~ 0.90의 범위로 나타났다. 검정기간 동안 보정된 매개변수는 실측치와 모의치의 유사성은 유지 하였으나 RMSE는 보정과정에 비해 0.27 ~ 3.03 mm 증가하는 것으로 나타났다. 기존 연구 결과에 의하면 강민구 등 (2013)은 24개의 저수지유역을 대상으로 모의 결과 RMSE는 2.7 ~ 10.2 mm, R^2 가 0.77 ~ 0.91의 범위를 나타내는 것으로 보고하였고, 이성용 등 (2009)은 발안 유역에 대한 모의 결과 R^2 가 0.84, 0.86의 값을 나타내는 것으로 보고하는 등 본 연구결과는 선행연구의 범위와 유사한 것으로 나타났다. 또한 보정기간에 비해 RMSE 값이 크게 나는데 이는 80 mm 이상의 경우가 보정기간의 경우 3 ~ 6회 발생한 것에 비해 검정기간에 8 ~ 11회로 증가하였기 때문으로 사료된다.

(2) SWAT 모형

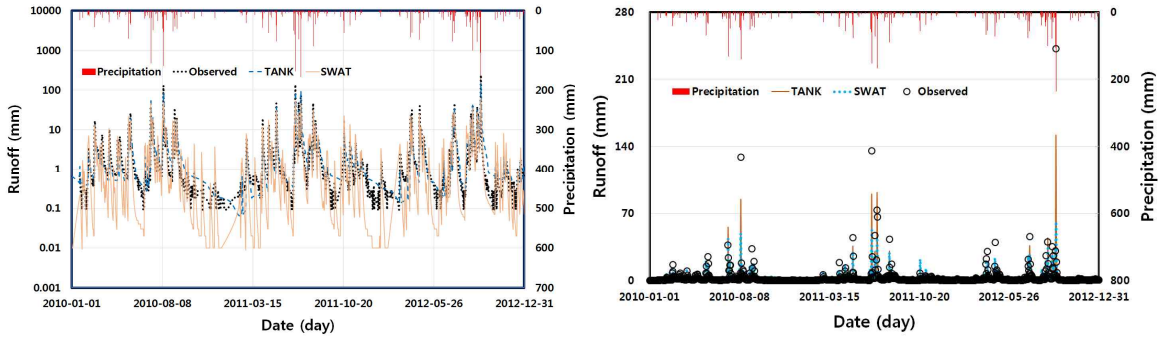
SCE-UA 기법에 의해 보정된 매개변수를 이용하여 모의하고 2010 ~ 2012년의 실측자료로 검정하였다. <표 3-1-22>는 통계적 변량을, (그림 3-1-20)은 유출량 모의결과를, (그림 3-1-21)은 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 검정결과 R^2 는 0.62 ~ 0.74, RMSE는 3.53 ~ 7.13 mm, NSE는 0.57 ~ 0.74의 범위로 나타났다. 밀양댐유역을 제외한 나머지 유역에서 보정결과에 비해 더 좋은 통계적 변량을 나타냈으나 RMSE는 -0.26 ~ 4.56 mm 증가하였는데 이는 Tank 모형과 마찬가지로 집중호우의 빈도증가가 원인이 되었을 것으로 사료된다. 또한 보정과정과 마찬가지로 홍수기와 갈수기에 유출량이 과소 모의되는 경향을 나타냈다 (그림 3-1-20).

<표 3-1-22> 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 통계적 변량

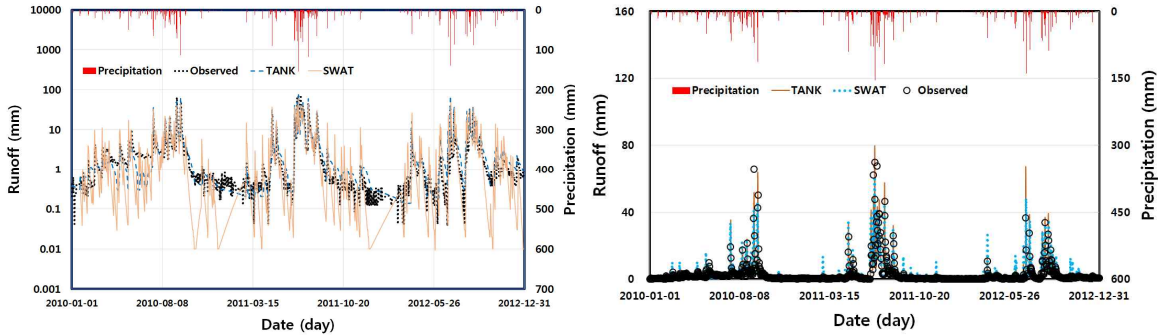
	Tank			SWAT		
	R ²	RMSE (mm)	NSE	R ²	RMSE (mm)	NSE
보령댐	0.74	5.46	0.74	0.62	6.60	0.62
밀양댐	0.85	4.49	0.83	0.66	7.13	0.57
횡성댐	0.82	3.02	0.81	0.74	3.53	0.74
용담댐	0.90	2.70	0.90	0.71	4.82	0.67



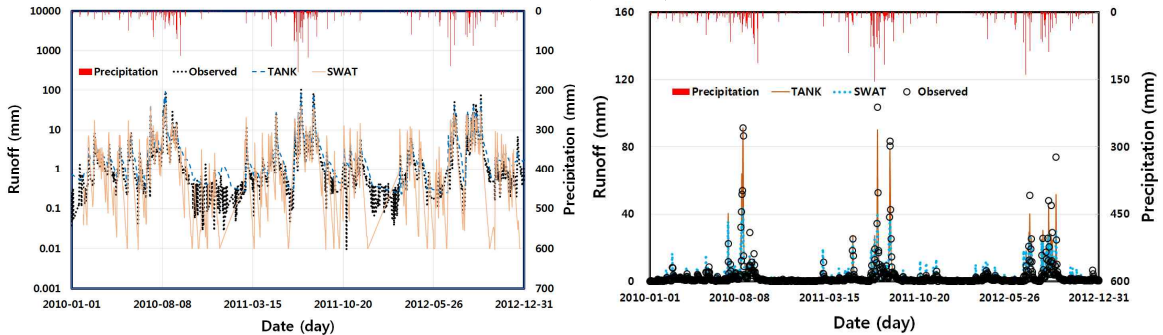
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역

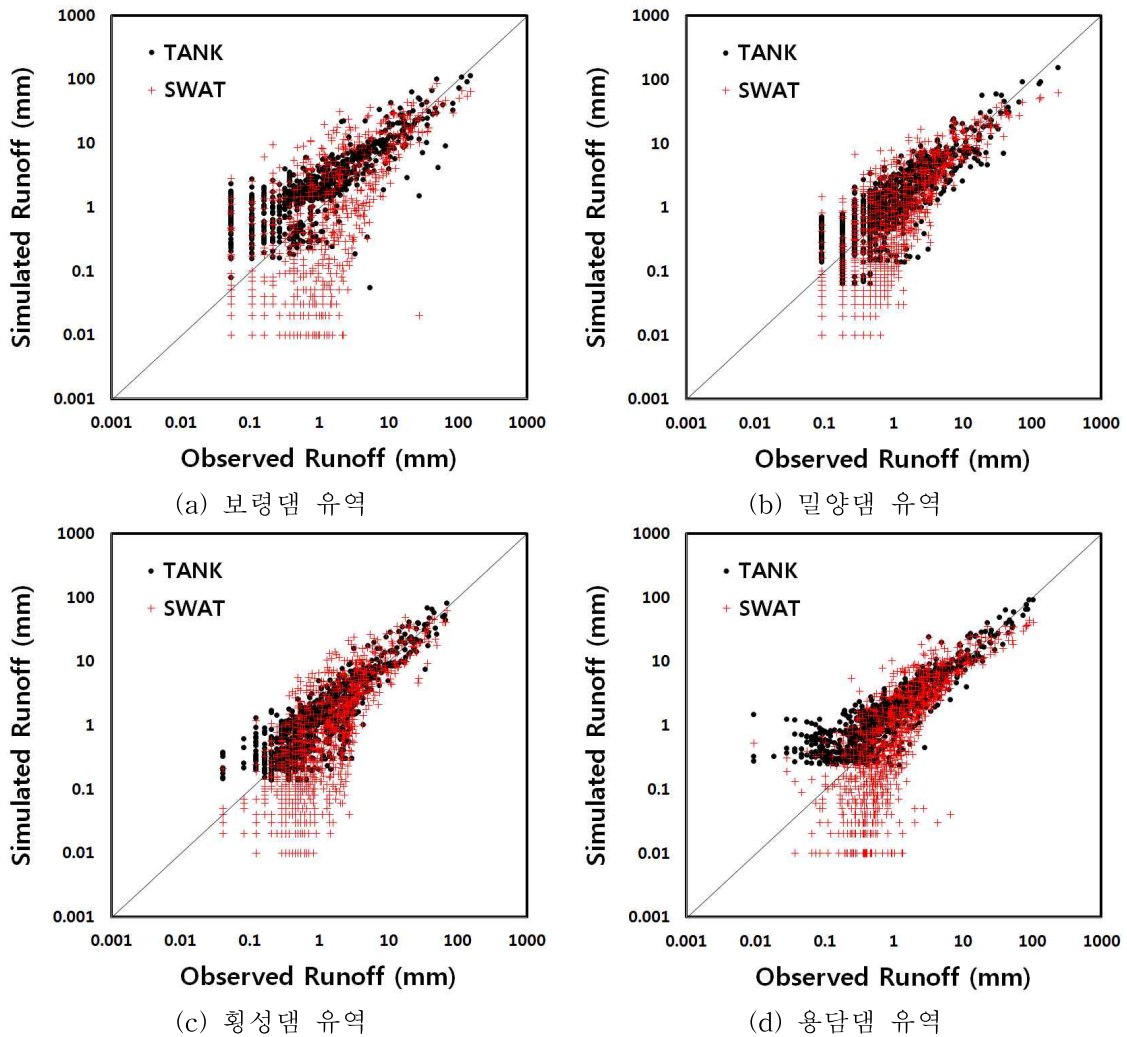


(c) 횡성댐 유역



(d) 용담댐 유역

(그림 3-1-20) 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유출량 비교



(그림 3-1-21) 검정기간 Tank 모형과 SWAT 모형의 유역별 산포도

마. 모형의 비교

본 연구에서는 Tank 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 최적화하였으며 보정 및 검정기간에 대해 비교하였다. 모의기간에 대해 통계적 변량과 도시적인 방법을 이용하여 비교한 결과 두 모형 모두 모의치가 실측치의 경향성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 하지만 통계적 변량과 도식적 방법을 통해 Tank 모형과 SWAT 모형을 비교한 결과 모든 유역에 대해서 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 더 좋은 결과를 나타냈다. <표 3-1-23>는 모형별 연평균 유출량을 보여주고 있다. 연평균 유출량의 경우 SWAT 모형은 실측치에 비해 83 ~ 101% 범위에서 모의되었으며, Tank 모형은 98 ~ 123%의 범위에서 모의되었다. 두 모형 모두 실측치와 유사한 범위 내에서 모의되었으나 유역에 따른 차이가 나타났다.

한편, 갈수기 유출량 모의에 있어 Tank 모형과 SWAT 모형 모두 실측치의 경향을 반영하지 못 하는 것으로 나타나는데, 이는 SWAT 모형과 Tank 모형의 매개변수 보정에 사용되었던 목적함수가 원인이 되었을 것으로 사료된다. 모형의 목적함수로 사용된 SSQ는 실측치와 모의치의 차의 제곱의 합으로부터 계산되기 때문에 매개변수의

최적화 과정에서 목적함수 값을 줄이기 위해 오차가 큰 홍수기에 대해서는 비교적 보정이 잘 되었으나 오차가 작은 갈수기에 대해서는 보정이 잘 되지 않은 것으로 사료된다. Jang et al. (2011)은 SWAT 모형의 auto-calibration 기능을 이용하여 모형을 보정할 때 직접유출과 기저유출로 분리하여 매개변수 보정을 실시하게 될 경우 모형의 정확도 향상에 도움이 될 수 있다고 보고한 바 있다.

한편, (그림 3-1-19), (그림 3-1-21)에서 SWAT 모형은 Tank 모형에 비해 더 다양한 범위로 저유량이 모의되는 것을 볼 수 있다. 이는 SWAT 모형의 경우 공간 특성을 고려한 준분포형 모형인 반면 Tank 모형은 저유량 모의시 3단 중 하단부에서만 모의가 이루어지기 때문으로 사료된다. 하지만, 모의 기간에 대해서 통계적 변량을 비교하여 평가한 결과 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 대체로 모의능력이 우수한 것으로 나타났다. 이는 유출량 모의에 있어 매개변수가 많은 모형이 더 다양한 범위로 모의할 수는 있으나 더 좋은 결과를 모의하는 것은 아니라는 것을 의미한다. Beven, K. J. (1989, 2007)와 Dunn, S. M. et al. (2008)에 따르면 많은 매개변수는 불확실성을 증가시켜 모형의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있고, 수문모형의 매개변수는 3-4개이면 충분하다고 보고한 바 있다. 따라서 유출량 자료를 보유한 지역에 대한 수문모형 적용 시 Tank 모형의 이용은 편의성을 유지하며 SWAT 모형에 비해 모의 능력이 떨어지지 않는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

<표 3-1-23> Tank 모형과 SWAT 모형의 연평균 유출량 비교

Watershed	Observed (mm/yr)	SWAT (mm/yr)	Tank (mm/yr)
보령댐	1130.0	1104.7	1328.5
밀양댐	996.1	834.4	984.7
횡성댐	1041.1	1047.3	1134.7
용담댐	1001.5	918.5	1231.5

4. 저수지 상류유역 수질 해석 모형의 개발 및 적용

4.1. LOADEST 회귀모형 매개변수 추정기법 개발

가. 회귀모형 매개변수 추정기법

(1) LOADEST

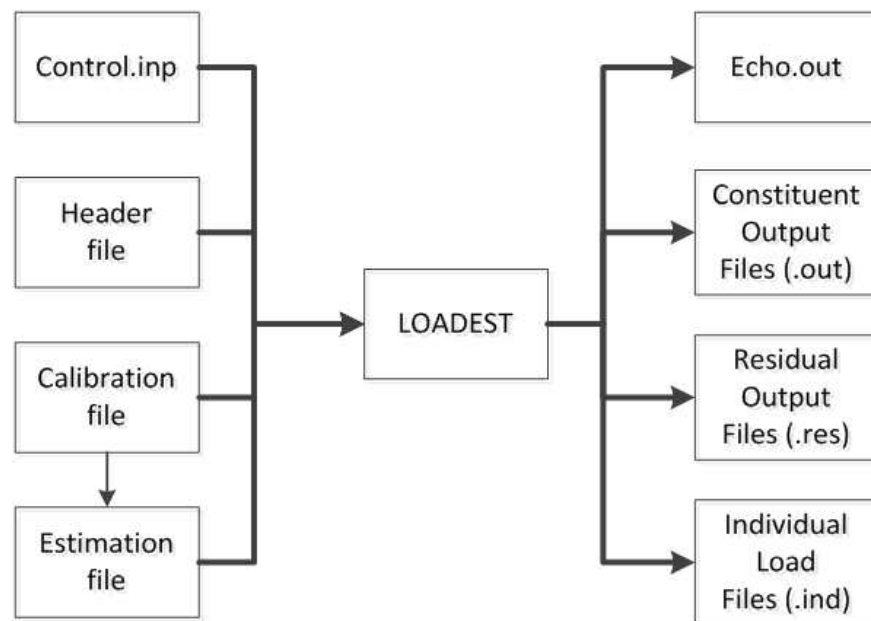
LOADEST 모형은 하천의 오염부하량을 예측하기 위해 미국 USGS (United States Geological Survey)에서 개발된 회귀식 기반 프로그램으로, 실측된 유량과 수질자료를 이용하여 프로그램에 내재된 오염부하 추정 회귀식의 매개변수를 보정하여 사용자가 최적 회귀 모델을 선택할 수 있도록 하는 모형이다 (Runkel et al., 2004). 모형 내 회귀식의 보정 및 검정을 위한 다양한 통계적 방법이 내재되어 있으며, 잔차분석, 월별 오염부하량, 표준오차 및 95% 신뢰수준에 대한 통계적 분석을 통해 모형의 적절성을 용이하게 평가할 수 있다 (Runkel et al., 2004; 신민환 등, 2009).

(가) 모형의 입출력구조

LOADEST 모형은 (그림 3-1-22)과 같이 4개의 입력자료와 4개의 출력자료로 구성

된다. Control file은 모형의 입력자료로 사용될 파일의 이름을 정의하는데 사용되며, header file은 오염부하를 모의할 수질항목, 사용하고자 하는 회귀식의 종류, 부하량 추정방법 등을 정의하는데 사용된다. Calibration file은 LOADEST 모형의 회귀식을 보정하는데 사용할 수질항목의 농도와 유량자료를 포함하고 있으며, estimation file은 보정된 회귀식을 이용하여 모의하고자 하는 기간의 유량자료를 포함하고 있다. 위와 같이 4개의 입력자료를 구축하여 LOADEST 모형을 실행할 경우 4개의 출력자료가 생성되게 된다.

Echo file은 모형이 실행되는 과정에서 사용된 입력자료와 발생한 오류를 포함하고 있는 파일로 모형의 실행과정에서 발생한 문제점을 점검하는데 사용된다. Constituent output file은 Part I 과 Part II로 나뉘어 있으며, 유량 및 수질자료를 이용하여 회귀식을 보정한 결과와 개발된 회귀식을 이용하여 추정한 오염부하량 결과를 요약하고 있다. 회귀식을 보정하는 과정에서 도출된 매개변수 및 다양한 통계적 결과를 포함하고 있으며 통계적 수치에 따라 부하량 산정방법을 결정하고, 보정된 모형의 적용성을 평가하는데 사용될 수 있다. Residual output file은 모형의 보정과정에서 생성된 부하량 결과와 잔차를 포함하고 있으며, individual load file은 개발된 회귀식을 이용하여 추정된 오염부하량 결과를 포함하고 있다.



(그림 3-1-22) LOADEST의 입출력자료 (Runkel et al., 2004)

(나) 모형의 회귀식

LOADEST 모형은 회귀식을 보정하는데 있어서 MLE (Maximum Likelihood Estimation), AMLE (Adjusted Maximum Likelihood Estimation), LAD (Least Absolute Deviation) 방법을 사용하여 오염부하량을 모의한다. MLE와 AMLE 방법은 보정된 모형의 잔차가 정규분포를 따를 때 사용하는 방법이며, LAD 방법은 그렇지 않을 경우 사용한다. 또한 MLE와 AMLE는 모형의 보정에 사용된 유량 또는 수질자료

의 이상치 수정여부에 따라 분류되며, 수정이 이루어진 경우 AMLE를 사용하며 그렇지 않은 경우 MLE 방법을 사용한다. 각 모의방법에 대한 설명은 Helsel and Hirsch (2002)와 Runkel et al. (2004)에 상세히 기술되어 있다.

<표 3-1-24> LOADEST의 회귀모형

Model Number	Regression model
1	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q$
2	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2$
3	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \text{dtime}$
4	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_3 \cos(2\pi \text{dtime})$
5	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \text{dtime}$
6	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime})$
7	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_3 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_4 \text{dtime}$
8	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_5 \text{dtime}$
9	$\ln(L) = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi \text{dtime}) + a_4 \cos(2\pi \text{dtime}) + a_5 \text{dtime} + a_6 \text{dtime}^2$
10	$\ln(L) = a_0 + a_1 \text{per} + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q \text{per}$
11	$\ln(L) = a_0 + a_1 \text{per} + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q \text{per} + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2 \text{per}$

* L = constituent load (kg/day)
 * lnQ = ln(Q) - center of ln(Q)
 * dtime = decimal time - center of decimal time

<표 3-1-24>는 LOADEST 모형에 내재된 회귀식의 형태를 나타내고 있다. LOADEST 모형의 회귀식은 11가지가 입력되어 있으며, 각 회귀식의 독립변수는 유량과 decimal time으로 구성되어 있다. 각 회귀식은 두 가지 변수 외에도 사용자가 임의로 변수를 추가할 수 있는 특징이 있다. LOADEST 모형의 회귀식은 하나의 종속변수에 여러 개의 독립변수를 가지고 있어 각 독립변수에 의한 다중 공선성이 발생할 수 있다. LOADEST 모형은 다중 공선성을 해결하기 위해 모형의 회귀식에 사용되는 독립변수인 유량과 decimal time을 중심화 (Centering)하여 입력변수로 사용한다. 각 변수의 중심화는 식 (3-1-7)에 의해 계산된다.

$$\tilde{T} = \bar{T} + \frac{\sum_{k=1}^N (T - \bar{T})^3}{2 \sum_{k=1}^N (T - \bar{T})^2} \quad (3-1-7)$$

여기서, T는 중심화하기 위한 변수의 데이터들, \tilde{T} 는 T로부터 중심화 된 값을, \bar{T} 는 T의 평균값을, N은 데이터의 개수를 나타낸다.

(2) 다중회귀분석

(가) 다중회귀분석 개요

회귀분석은 한 변수를 종속변수 (Dependent Variable)로 그리고 다른 변수를 독립변수 (Independent Variable)하여 이들 간의 관계를 분석하는 것을 말하며, 다중회귀분석 (Multiple Regression Analysis)은 독립변수가 두 개 이상인 경우를 말한다. 독립변수가 하나인 경우에 비해 추정능력을 높일 수 있으며, 여러 변수간의 관계를 동시에 파악할 수 있는 장점을 갖고 있다.

(나) 다중회귀식 추정방식

다중회귀분석을 실시할 때 독립변수를 택하는 방법은 주로 동시입력방식 (enter)과 단계입력방식 (stepwise)이 사용된다. 동시입력방식은 회귀식 개발에 고려되는 모든 입력변수를 동시에 분석하는 방식이다. 동시입력방식은 다른 독립변수들이 통제된 상태에서, 특정 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 분석에 사용되는 모든 독립변수가 종속변수에 미치는 영향정도를 파악할 수 있다.

단계입력방식은 회귀식 개발에 사용되는 독립변수를 하나씩 회귀식에 포함시키는 방식으로, 영향력이 높은 독립변수 순으로 회귀식에 포함된다. 변수가 추가되는 과정에서 나중에 추가된 변수로 인해 기존의 변수가 종속변수와의 영향력이 낮아지게 되면 앞서 포함된 독립변수는 제거되는 과정을 거치며, 이 후 더 이상 추가되거나 제거되는 변수가 없을 때까지 추가와 제거의 과정이 반복된다.

본 연구에서는 단계입력방식을 사용하여 LOADEST 모형 회귀변수를 종속변수로, 유역특성을 독립변수로 하는 회귀분석을 실시하였으며, 회귀분석에는 IBSS SPSS Statistics 22 (SPSS, Inc., 2013)를 이용하였다.

나. 연구대상지 및 자료구축

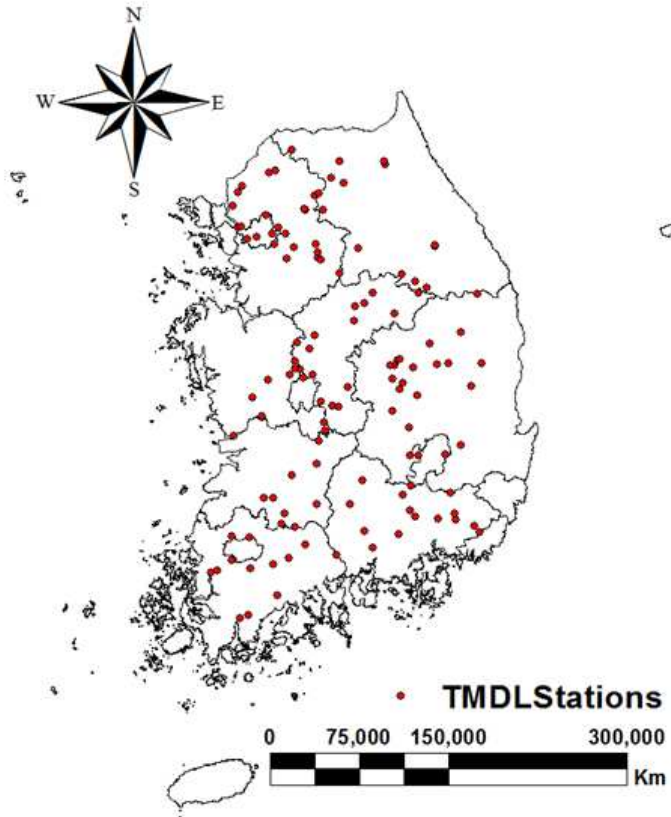
(1) 수문·수질자료 구축

유역특성을 고려한 LOADEST 모형회귀변수 추정방법 개발을 위해 수질오염총량관리제도가 실시되는 단위유역을 대상유역으로 선정하였다. 대상유역은 수계별로 한강수계 36개, 금강수계 16개, 낙동강수계 23개, 영산강수계 6개로 총 81개의 유역을 선정하였다. 또한, 개발된 회귀식의 적용성 평가를 위해 총 4개 유역을 선정하여 검증을 실시하였다.

대상유역의 유출량 및 수질자료는 환경부 물환경정보시스템 (Water Information System, WIS)을 통해 수질오염총량제가 실시된 2004년부터 7 ~ 10일 단위로 측정된 자료를 수집하였으며, 유역별로 최소 329개에서 최대 497개의 자료를 이용하였다. (그림 3-1-23)은 대상유역의 유량 및 수질측정망의 위치를 나타내고 있다.

(2) 지형자료 구축

LOADEST 모형 회귀변수 추정에 사용될 유역특성 추출을 위해 1:25,000 국토지리정보원 수치지도와 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여, 유역특성 자료와 토지이용현황을 구축하였다. 구축된 자료는 <표 3-1-25>와 같다.



(그림 3-1-23) 대상구역의 위치

<표 3-1-25> 대상구역특성 및 토지이용현황

구역	면적 (km ²)	유로연장 (km)	논 (%)	밭 (%)	산림 (%)	불투수율 (%)
갑천A	649.9	58.30	8.5	7.1	59.3	8.9
금분A	290.2	32.98	13.0	11.8	62.8	1.8
금분B	929.1	61.44	10.9	9.9	70.2	1.5
금분C	1531.7	96.02	8.5	9.1	75.0	1.3
금분D	1857.3	117.31	9.5	9.8	73.1	1.5
금분E	2857.9	153.46	9.3	8.8	73.7	1.5
금분G	4901.2	267.06	10.0	8.6	69.7	2.7
금분H	6857.2	276.79	13.4	10.0	63.8	3.3
금분J	8171.9	328.49	14.0	9.7	63.9	3.1
금분L	9713.0	403.58	17.4	9.7	60.1	3.2
논산A	486.7	59.71	26.8	10.2	52.0	3.1
미호B	1604.7	74.61	22.2	13.5	49.0	4.7
미호C	1847.1	83.73	21.9	13.4	49.2	4.7
병천A	243.2	31.11	17.2	11.0	61.2	3.2
유등A	37.3	13.49	6.9	5.8	84.6	0.5
초강A	630.8	64.52	10.2	8.1	74.7	1.2
감천A	861.1	60.32	13.8	8.7	66.7	2.7
금천A	9.1	6.07	51.1	12.5	21.7	3.5
금호A	942.9	64.05	8.6	7.0	70.5	2.0

<표 3-1-25> 대상유역특성 및 토지이용현황 (계속)

유역	면적 (km ²)	유로연장 (km)	논 (%)	밭 (%)	산림 (%)	불투수율 (%)
금호B	1479.6	81.75	9.3	7.2	64.3	3.2
금호C	2101.9	116.59	8.6	6.2	63.7	5.3
길안A	322.0	39.38	2.7	6.9	81.3	0.9
낙분A	196.4	31.07	0.0	5.0	86.5	2.5
낙분C	4429.8	216.05	4.8	8.9	77.9	1.3
낙분D	9364.9	270.91	10.2	8.8	71.4	1.7
낙분E	10748.3	336.10	11.0	8.8	70.1	1.9
낙분G	14223.1	422.95	11.1	8.3	67.9	2.9
낙분H	16826.3	456.17	11.4	8.1	68.1	2.9
낙분I	18472.0	497.08	11.9	8.3	67.0	3.1
낙분J	18951.8	515.85	12.2	8.3	66.5	3.3
남강A	1007.7	56.44	13.3	5.9	73.6	1.5
남강B	1690.3	90.92	14.2	5.5	73.1	1.6
남강D	648.3	65.96	16.2	8.0	58.8	5.8
남강E	1148.5	100.66	17.0	9.2	57.6	5.9
내성A	914.4	66.02	12.2	9.5	64.9	2.2
밀양B	1402.3	92.30	9.0	5.2	71.7	2.7
황강A	46.3	13.15	31.6	6.2	51.5	4.5
황강B	1302.9	110.50	14.0	6.5	69.9	2.0
회천A	461.0	37.80	13.4	7.9	69.9	1.9
섬본C	1439.0	119.24	14.5	9.2	67.2	1.8
영본B	1983.5	68.77	18.5	8.9	55.3	6.4
영본C	2362.0	93.82	20.6	10.7	51.6	6.1
영본D	2599.5	99.21	21.5	11.3	50.5	5.9
오수A	370.9	45.63	23.3	9.0	59.4	2.1
요천A	160.9	26.47	5.1	3.4	84.8	1.0
경안A	206.4	27.69	8.5	8.6	59.7	8.3
경안B	465.3	40.09	8.3	8.2	62.8	7.6
골지A	960.5	90.77	1.2	8.9	84.8	0.7
공릉A	146.2	30.15	18.3	4.7	57.6	5.6
달천A	971.7	110.42	7.9	10.4	76.0	1.3
달천B	1469.1	170.49	9.9	11.4	70.2	1.8
북하A	305.5	38.60	29.5	13.3	39.5	6.0
북한A	693.2	68.47	7.0	1.3	82.9	1.6
북한B	1418.0	97.19	5.4	2.5	84.9	1.5
북한C	4409.8	186.19	3.7	3.2	86.3	1.3
북한D	6499.7	223.02	4.5	3.7	85.5	1.2
섬강A	716.7	63.68	9.6	6.3	79.2	1.4
섬강B	1482.1	99.24	10.2	6.6	75.7	2.2
소양A	1080.5	90.80	1.9	3.4	92.6	0.3
신천A	344.6	38.73	17.8	7.7	59.8	3.7
양화A	181.9	32.06	33.4	24.5	25.2	4.7
영평A	556.3	45.92	13.6	7.7	65.8	3.8

<표 3-1-25> 대상유역특성 및 토지이용현황 (계속)

유역	면적 (km ²)	유로연장 (km)	논 (%)	밭 (%)	산림 (%)	불투수율 (%)
오대A	451.4	62.52	1.6	5.7	89.8	0.6
옥동A	471.9	53.00	0.7	4.4	92.9	0.4
왕숙A	272.4	38.82	7.2	11.8	63.0	5.7
인북A	735.0	57.27	3.1	2.4	90.6	0.8
제천A	462.7	42.53	10.9	6.4	75.4	2.5
조종A	258.0	40.22	3.4	7.4	82.1	1.3
주천A	599.4	89.43	5.8	7.8	82.7	0.8
중량A	122.6	18.16	9.7	5.0	60.3	10.7
탄천A	106.8	26.56	4.2	14.2	91.9	17.1
평창A	1766.1	143.74	4.0	8.9	82.8	0.9
한강B	5524.5	246.70	2.2	8.3	84.9	0.9
한강C	6626.7	305.87	2.8	8.3	83.4	1.0
한강E	11580.9	399.54	8.0	9.4	74.5	1.7
한강F	19975.4	441.75	6.8	7.3	77.8	1.8
한강G	20417.5	456.61	6.9	7.5	77.3	1.9
한강H	21112.5	479.73	6.7	7.4	76.2	2.6
한강I	21587.7	496.83	6.7	7.3	75.2	3.2
홍천A	1524.0	135.06	6.9	5.1	83.9	1.1
흑천A	307.0	40.16	10.3	7.0	75.0	2.4

다. 오염부하량 추정 회귀모형 구축

(1) T-N 부하량 추정 회귀모형 구축

(가) T-N 부하량 추정 회귀모형

LOADEST는 9개의 회귀식을 제공하고 있으며, 회귀식의 독립변수는 로그로 치환된 유량과 측정시간의 조합으로 이루어져 있다. 또한 측정시간은 sin 및 cos 함수와의 결합을 통해 계절적 변동 (Seasonality)을 나타내는 변수로써 포함된다. 본 연구에서는 9개의 모형을 이용하여 모의를 진행하였으며, 모의결과 9개의 식 모두 R²와 NSE 값을 통해 비교적 실측치를 잘 반영하여 모의되는 것으로 나타났다. 산정된 회귀식의 매개변수와 유역별 특성 및 토지이용간의 상관분석 결과 sin(dtime)과 cos(dtime)항의 매개변수는 서로 연관이 없는 것으로 나타나, 두 항이 포함되지 않은 회귀식을 이용하였다. Sin 및 cos 항이 포함되지 않은 식은 1, 2, 3, 5번이 있으며, 그 중 통계적 변량을 통해 결과가 가장 적합하게 나온 5번식을 T-N 부하량 모의를 위한 회귀식으로 선택하였다. 국내에서 LOADEST 모형 회귀식 적용사례로는 박윤식 등 (2015)이 한강 유역에 LOADEST 모형을 적용하여 부유사 모의를 하였으며, 회귀식 1번과 3번의 적용성이 높다고 평가한바 있다.

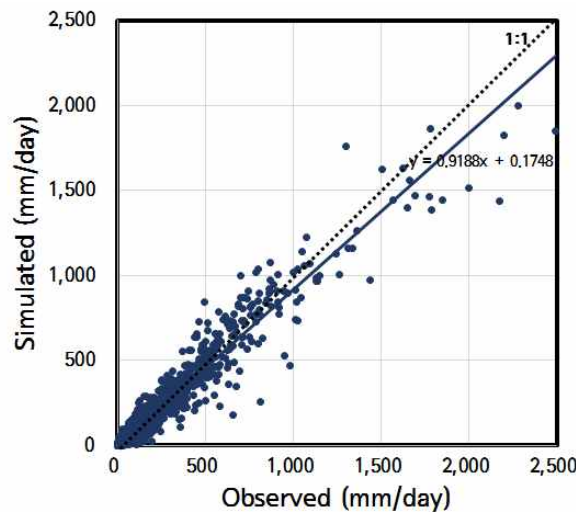
(나) 회귀모형 매개변수 결정

선택된 회귀식의 매개변수를 결정하기 위해 대상유역의 유량 및 수질자료를 구축하고, LOADEST 모형을 이용하여 오염부하량을 모의하고 최적 매개변수를 결정하였다.

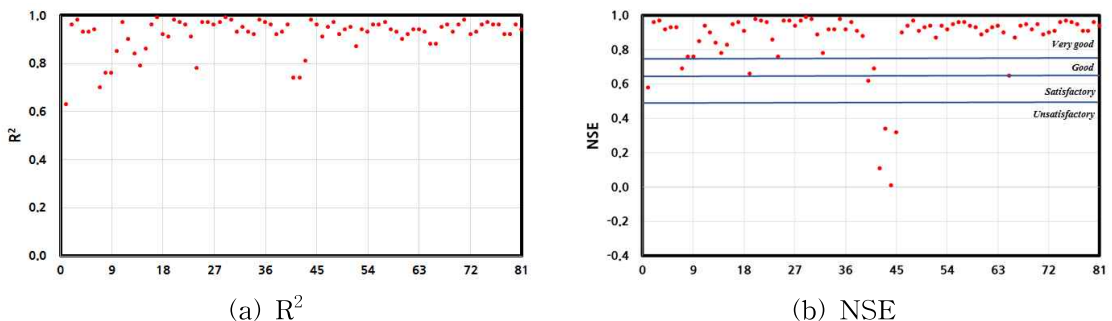
(그림 3-1-24)는 연구대상지 전체 구역의 T-N 부하량 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고 있으며, (그림 3-1-25)는 구역별 모의된 오염부하량을 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다.

오염부하량 모의결과, R^2 는 0.65 ~ 0.99, NSE는 0.01 ~ 0.99, RSR은 0.12 ~ 0.97, PBIAS는 -86.46 ~ 16.77의 범위로 나타나 대부분의 구역에서 모의치가 실측치 경향성을 유지하고, 잘 모의되는 것으로 나타났다. Moriasi et al. (2007)에 따르면 월 단위 유출량 자료의 모의시 NSE가 0.50 이상, RSR이 0.70 이하일 때, 모의결과가 만족스럽다고 보고한바 있으며, 일반적으로 모형의 모의결과는 시간간격이 짧을수록 모의치가 통계적 변량이 낮게 나타나기 때문에 (Engel et al., 2007), 본 연구에서는 일 단위의 수질자료에 대해 통계적 변량을 산정하였으므로 보다 낮은 통계적 변량으로도 모형이 실측치를 잘 반영하였다고 판단하였다. 한편, 박윤식 등 (2015)은 LOADEST 모형을 이용하여 부유사 모의결과 회귀식 1, 3번을 적용할 때 실측치와 가장 유사하게 모의되는 것으로 나타나며, 이 때 회귀식 1번의 R^2 은 0.11 ~ 0.99, NSE는 -1.33 ~ 0.99로 나타나며, 3번은 R^2 0.13 ~ 0.99, NSE -1.74 ~ 0.99로 나타난다고 보고한바 있다.

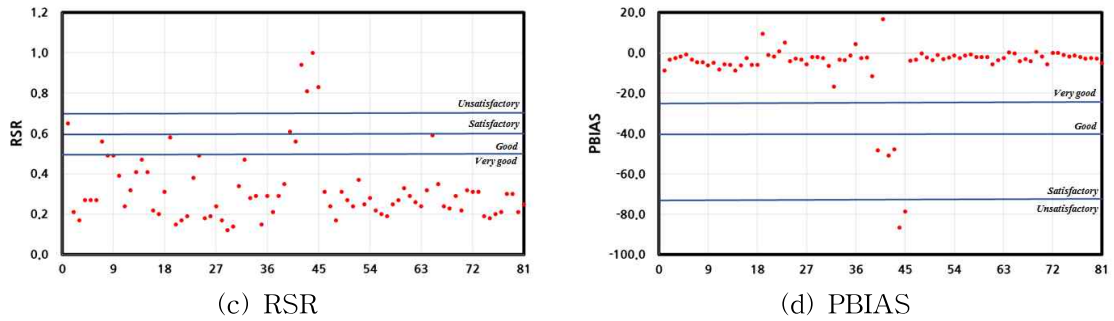
또한, LOADEST에 의한 T-N 부하량 추정결과 모의치는 실측치에 비해 과소모의되는 것으로 나타났으며, 이는 Morse et al. (2014)에 의해서 보고된바 있다.



(그림 3-1-24) T-N 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도



(그림 3-1-25) T-N 부하량 LOADEST 모의치의 통계적 변량



(그림 3-1-25) T-N 부하량 LOADEST 모의치의 통계적 변량 (계속)

(2) T-P 부하량 추정 회귀모형 구축

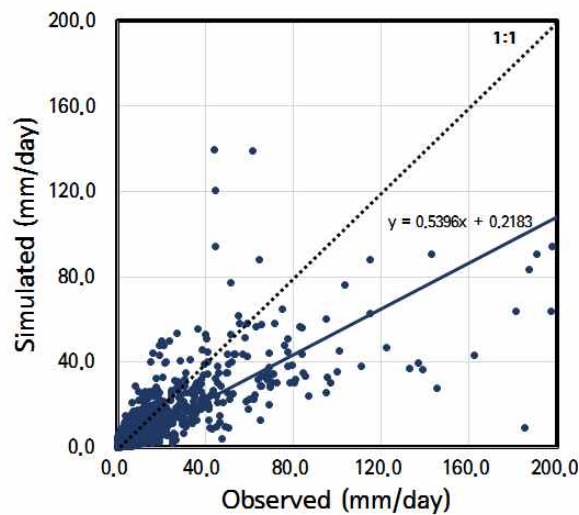
(가) T-P 부하량 추정 회귀식

T-N과 동일하게 sin 및 cos항이 포함되지 않은 1, 2, 3, 5 회귀식을 대상으로 모의를 진행하였으며, 통계적 변량을 통해 모의결과가 가장 적합하게 나타난 3번 회귀식을 T-P 부하량 모의를 위한 회귀식으로 선정하였다.

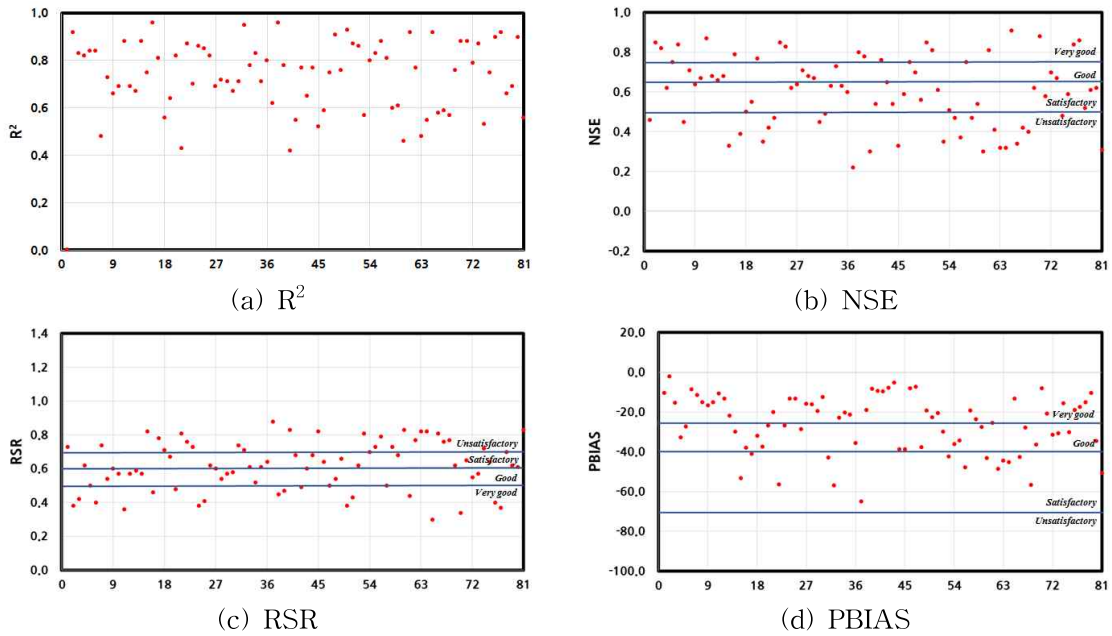
(나) 회귀식 매개변수 결정

(그림 3-1-26)은 연구대상지 전체 구역의 T-N 부하량 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고 있으며, (그림 3-1-27)은 구역별 모의된 오염부하량을 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과 통계적 변량은 R^2 0.42 ~ 0.96로, NSE 0.22 ~ 0.91, RSR 0.30 ~ 0.88, PBIAS -65.05 ~ -2.13으로 나타나, 일부 구역에서 다소 낮은 통계적 변량을 나타내었으나, 선행연구 (Moriyasi et al., 2007; 박윤식 등, 2015)를 통해 모의결과가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났으며, 구역별로 추정된 최적매개변수를 적용하는 것이 가능할 것으로 사료된다.

한편, T-N과 마찬가지로 실측치에 비해 모든 구역에서 과소모의 되는 것으로 나타났으며, 차이가 크게 나타나 보다 정확한 모의를 위해서는 모의치의 보정이 필요할 것으로 사료된다.



(그림 3-1-26) T-P 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도



(그림 3-1-27) T-P 부하량 LOADEST 모의치의 통계적 변량

라. 회귀모형 매개변수 추정

(1) T-N 회귀식 매개변수 추정

유역특성을 고려한 회귀식 매개변수 추정을 위해 유역특성인자를 독립변수로, LOADEST에 의해 결정된 회귀식의 최적 매개변수를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석에 사용된 유역특성인자는 유역면적, 토지이용현황, 불투수면 비율, 유로연장이 사용되었다. 유역특성인자는 국토지리정보원의 1/25,000 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM) 자료와 환경부 (2007)의 중분류 토지피복지도를 재분류하여 구축한 자료를 이용하였다. 불투수면 비율은 김학관 (2009)이 제시한 방법에 따라, 시가지 및 시설재배지를 불투수 지역으로 분류하고, 시가지의 불투수율을 60%, 시설재배지의 불투수율을 90%로 적용하여 불투수면적 및 불투수면적 비율을 산정하였다. 다중회귀분석은 단계입력방식을 이용하여 분석하였다. 상관성이 큰 독립변수가 먼저 선택되어 회귀식의 독립변수로 포함되었으며, 반복과정에서 상관성이 떨어지는 변수 및 공선성이 발생하는 변수는 제외되었다.

<표 3-1-26>은 다중회귀분석에 사용된 유역특성인자와 회귀식의 최적 매개변수 사이의 Pearson 상관분석 결과를, <표 3-1-27>은 다중회귀분석에 의해 개발된 매개변수 추정 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 나타내고 있다. 개발된 회귀식은 매개변수에 따라 다른 유역특성에 대해 상관성을 나타내었으나, 공통적으로 불투수면과 관련하여 높은 상관성을 보였으며, 2가지 또는 3가지의 유역특성을 반영하여 회귀식이 완성되었다. 개발된 회귀식의 결정계수는 0.256 ~ 0.725의 범위로, 상관계수는 0.506 ~ 0.852의 범위로 나타났다. 다소 낮은 상관성을 갖는 회귀식이 있었으나, 김선주 등 (2000)은 TANK 모형의 매개변수를 유역특성에 따라 다중회귀분석하여 0.42 ~ 0.99의 상관계수를 갖는다고 보고한바 있으며, 안지현 (2013)은 유역경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정 회귀식을 개발함에 있어서 0.40 ~ 0.79의 상관계수를 갖는다고 보고한 바

있어, 본 연구에서 개발된 회귀식이 선행연구결과의 범위에 있으므로 타당성이 있다고 사료된다.

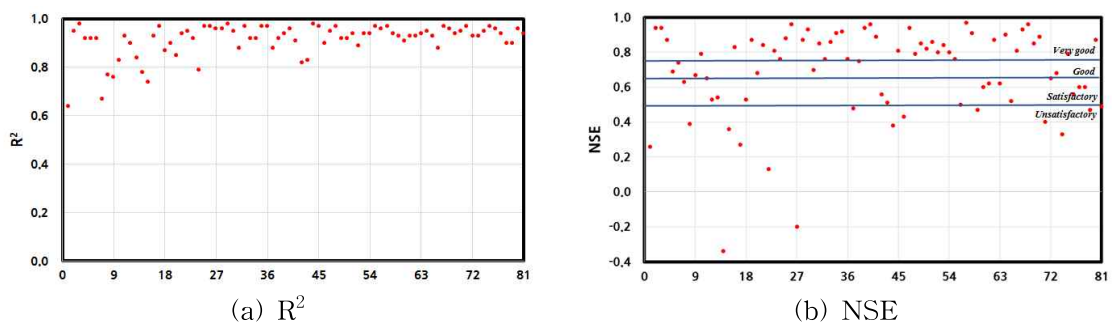
<표 3-1-26> 유역특성과 T-N 회귀모형 매개변수간의 상관계수

모형 매개변수	log(FL)	log(Im)	log(A)
a ₀	0.758	0.254	0.758
모형 매개변수	log(Im)	log(P)	
a ₁	-0.706	-0.074	
모형 매개변수	log(P)	log(Im)	
a ₂	-0.092	0.528	
모형 매개변수	Im	log(U)	
a ₃	-0.473	-0.290	

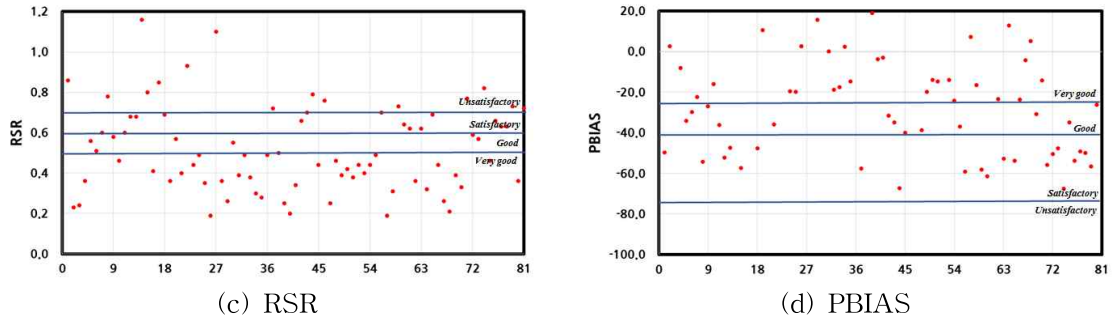
<표 3-1-27> T-N 회귀모형 매개변수 추정 회귀식과 상관계수

모형 매개변수	회귀식	R	R ²
a ₀	$3.480 + 0.003\log(FL) + 1.618\log(Im) + 1.309\log(A)$	0.850	0.722
a ₁	$0.983 - 0.348\log(Im) + 0.094\log(P)$	0.753	0.567
a ₂	$0.018 - 0.037\log(P) + 0.084\log(Im)$	0.638	0.407
a ₃	$0.033 - 0.004 \times Im - 0.034\log(U)$	0.511	0.261

(그림 3-1-28)은 개발된 회귀식으로 산정한 매개변수로 모의한 부하량 결과를 평가한 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과 R²는 0.64 ~ 0.98, NSE는 -0.34 ~ 0.97, RSR은 0.19 ~ 1.16, PBIAS는 -67.64 ~ 132.65의 범위로 나타났다. 대부분의 유역에서 모의결과는 실측치의 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났으며 (Moriassi et al., 2007), 일부유역에서 통계적 변량이 낮게 나타났으나, LOADEST의 선행연구범위에 속하는 것으로 나타났으며, 일 단위의 모의가 진행되었기 때문에 Moriassi et al. (2007)에 의해 제안된 통계적 변량에 비해 낮은 값을 나타내더라도 회귀식이 적절하게 매개변수를 산정할 수 있다고 사료된다.



(그림 3-1-28) T-N 매개변수 추정결과에 의한 LOADEST 모의치의 통계적 변량



(그림 3-1-28) T-N 매개변수 추정결과에 의한 LOADEST 모의치의 통계적 변량 (계속)

(2) T-P 회귀식 매개변수 추정

T-P 회귀식 매개변수 추정을 위한 회귀식은 T-N과 같은 방식으로 실시하였으며, <표 3-1-28>은 유역특성인자와 T-P 회귀식 최적매개변수 사이의 Pearson 상관분석 결과를, <표 3-1-29>는 개발된 매개변수 추정 회귀식과 상관계수 및 결정계수를 나타내고 있다.

T-N과 마찬가지로 매개변수에 따라 다른 유역특성에 대해 상관성을 나타내었으며, 불투수면에 대해 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다. T-P 매개변수 추정 회귀식은 3개의 유역특성을 고려하여 개발되었으며, 결정계수는 0.507 ~ 0.766의 범위로 T-N 보다는 다소 높은 범위를 갖는 것으로 나타나 개발된 회귀식의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

<표 3-1-28> 유역특성과 T-P 회귀모형 매개변수간의 상관계수

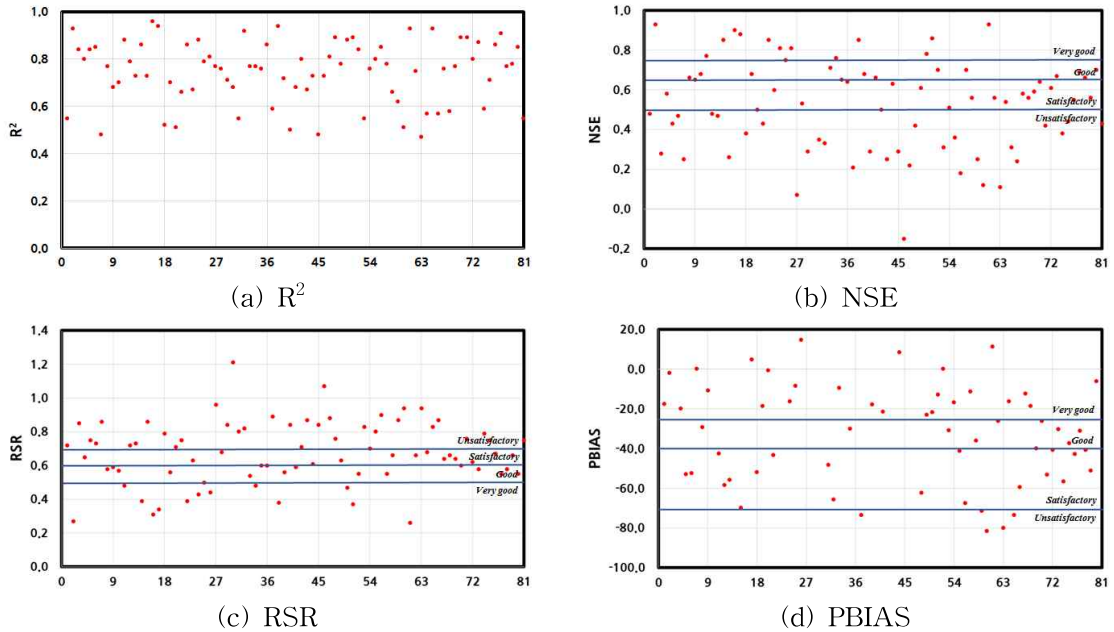
모형 매개변수	FL	log(Im)	log(A)
a0	0.688	0.473	0.654
모형 매개변수	log(Im)	U	log(P)
a1	-0.613	0.093	-0.067
모형 매개변수	log(Im)	log(A)	Im
a2	-0.681	-0.102	-0.675

<표 3-1-29> T-P 회귀모형 매개변수 추정 회귀식과 상관계수

모형 매개변수	회귀식	R	R ²
a0	$-0.973 + 0.004FL + 3.113\log(Im) + 1.344\log(A)$	0.875	0.766
a1	$1.045 - 0.517\log(Im) + 0.022U + 0.092\log(P)$	0.712	0.507
a2	$0.071 - 0.069\log(Im) - 0.029\log(A) - 0.011Im$	0.750	0.562

(그림 3-1-29)는 개발된 회귀식으로 산정한 매개변수로 모의한 부하량을 편의보정한 결과의 통계적 변량을 나타내고 있다. 모의결과 R²는 0.47 ~ 0.96, NSE는 -0.47 ~ 0.93, RSR은 0.26 ~ 1.21, PBIAS는 -81.46 ~ 134.74의 범위로 나타났다. T-N에 비

해 일부 유역에서 통계적 변량이 선행 연구에서 벗어나는 것으로 나타났는데 고수위 자료가 많이 있는 유역에서 통계적 변량이 낮게 나타났다. 그러나 고수위 자료를 제외하고 모의결과는 실측치의 경향성과 크기를 잘 모의하는 것으로 나타나 매개변수 추정에 회귀식의 적용이 가능할 것으로 사료된다.



(그림 3-1-29) T-P 매개변수 추정결과에 의한 LOADEST 모의치의 통계적 변량

마. 미계측 유역 적용성 평가

개발된 오염부하량 추정 회귀식의 적용성 평가를 위해 4개의 대표유역을 선정하고, 다중회귀식과 인공신경망을 이용하여 매개변수를 추정하고 모의하였다. 모의된 결과를 실측치와 LOADEST 기반 모의결과와 비교하였다. 대상유역은 가평A, 한강A, 내성B, 보청A를 선정하였으며, <표 3-1-30>은 대상유역의 특성과 토지이용현황을 나타내고 있다.

<표 3-1-30> 시범유역특성 및 토지이용현황

유역	면적 (km ²)	유로연장 (km)	논 (%)	밭 (%)	산림 (%)	불투수율 (%)
가평A	304.4	41.16	2.5	3.0	89.9	1.0
한강A	4805.9	199.22	2.1	8.4	85.3	0.8
내성B	1516.4	106.56	14.8	11.0	61.7	2.2
보청A	406.1	39.85	17.0	9.7	66.1	1.7

(1) T-N 회귀식 적용성 평가

<표 3-1-31>은 다중회귀분석을 통해 개발된 회귀식을 이용하여 산정한 매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정된 매개변수를 나타내고 있으며, <표 3-1-32>는 부하량 모의치에 대한 방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, (그림 3-1-30)은 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

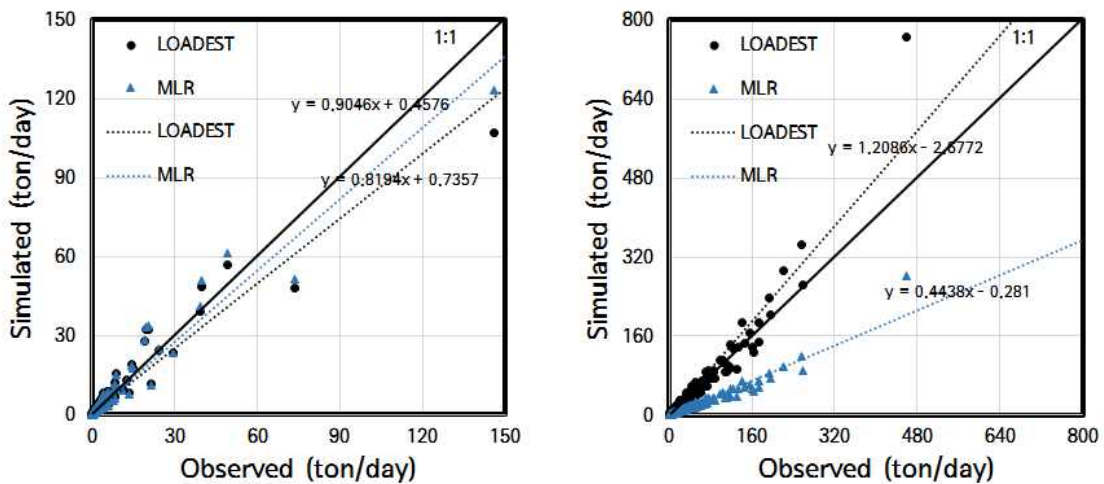
모의결과 LOADEST의 통계적 변량은 R^2 0.92 ~ 0.97, NSE 0.83 ~ 0.97, RSR 0.18 ~ 0.42, PBIAS 9.20 ~ 19.59로 나타났으며, 다중회귀분석 결과로부터의 통계적 변량은 R^2 0.93 ~ 0.97, NSE 0.59 ~ 0.95, RSR 0.22 ~ 0.64, PBIAS -56.85 ~ 88.71로 나타났다. 통계적 변량을 통해 LOADEST 모형을 이용하여 추정된 회귀매개변수가 실측치에 더 가까운 모의를 하는 것으로 나타났으나, 두 가지 방법 모두 Moriasi et al. (2007)이 제안한 범위에 통계적 변량이 속하여, 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

<표 3-1-31> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 추정모형 매개변수

유역		가평A	한강A	내성B	보청A
LOADEST	a_0	6.9603	9.7135	8.8744	6.7831
	a_1	0.9999	1.0077	0.9637	1.0605
	a_2	-0.0042	0.0202	0.0076	0.0052
	a_3	0.0082	-0.0040	0.0062	-0.0310
MLR	a_0	6.8268	8.7530	8.5225	7.3856
	a_1	1.0267	1.0437	0.9728	1.0188
	a_2	0.0017	-0.0012	0.0037	-0.0082
	a_3	0.0127	-0.0016	-0.0113	-0.0073

<표 3-1-32> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 추정모형 통계적변량

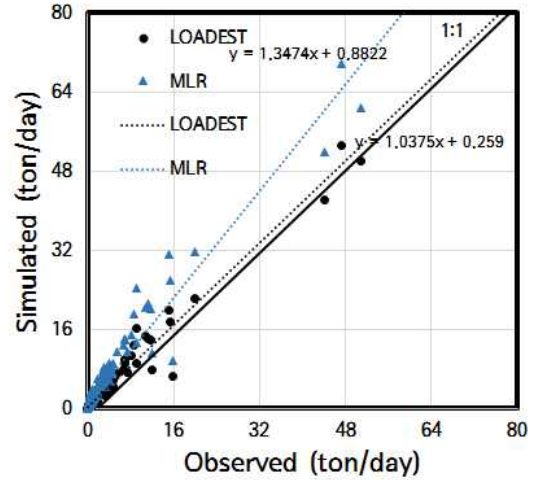
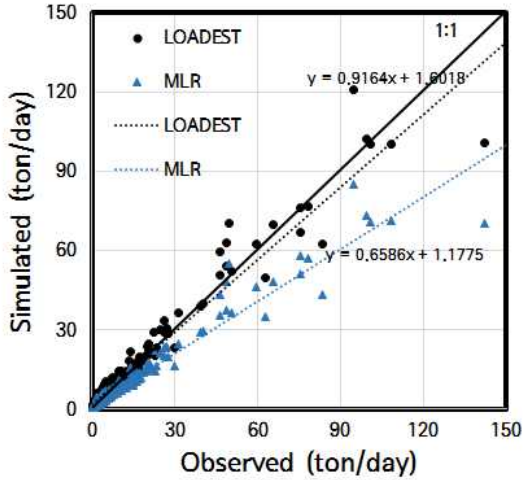
유역		가평A	한강A	내성B	보청A
LOADEST	R^2	0.92	0.93	0.97	0.97
	NSE	0.92	0.83	0.97	0.96
	RSR	0.28	0.42	0.18	0.20
	PBIAS	12.65	9.20	9.55	19.59
MLR	R^2	0.94	0.93	0.97	0.94
	NSE	0.95	0.59	0.86	0.71
	RSR	0.22	0.64	0.37	0.54
	PBIAS	9.57	-56.85	-20.98	88.71



(a) 가평A

(b) 한강A

(그림 3-1-30) 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도



(c) 내성B

(d) 보청A

(그림 3-1-30) 다중회귀분석에 의한 T-N 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도 (계속)

(2) T-P 회귀식 적용성 평가

<표 3-1-33>은 다중회귀분석을 통해 개발된 지역화식을 이용하여 산정한 회귀매개변수와 LOADEST 모형을 이용하여 추정한 회귀매개변수를 나타내고 있으며, <표 3-1-34>는 부하량 모의치에 대한 방법별 통계적 변량을 나타내고 있다. 한편, (그림 3-1-31)는 실측치와 모의치 간의 산포도를 나타내고 있다.

모의결과 LOADEST의 통계적 변량은 R^2 0.69 ~ 0.93, NSE 0.55 ~ 0.89, RSR 0.33 ~ 0.67, PBIAS -27.36 ~ 27.67로 나타났으며, 다중회귀분석 결과로부터의 통계적 변량은 R^2 0.64 ~ 0.93, NSE 0.54 ~ 0.87, RSR 0.36 ~ 0.68, PBIAS -51.06 ~ 38.00으로 나타나, LOADEST 모형을 이용하여 추정한 회귀매개변수가 실측치에 더 가까운 모의를 하는 것으로 나타났다. T-N에 비해 모의의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났으나, 두 가지 방법 모두 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

<표 3-1-33> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 추정모형 매개변수

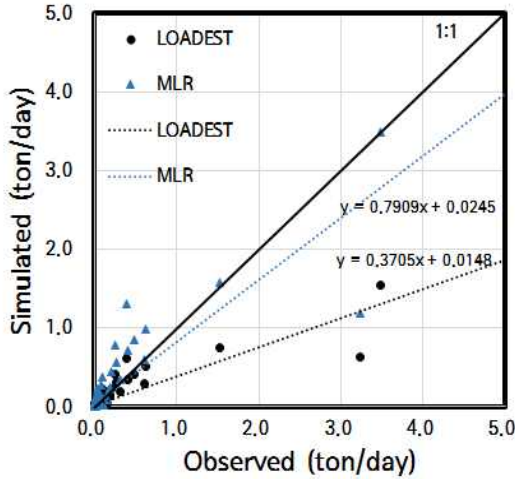
구역		가평A	한강A	내성B	보청A
LOADEST	a_0	2.0674	5.0249	5.2748	2.6868
	a_1	1.0619	1.3828	1.3503	1.4693
	a_2	0.0162	-0.0353	-0.0246	-0.0655
MLR	a_0	2.4764	4.4950	4.8039	3.4068
	a_1	1.1576	1.3045	1.2158	1.2530
	a_2	-0.0104	-0.0386	-0.0695	-0.0391

<표 3-1-34> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 추정모형 통계적변량

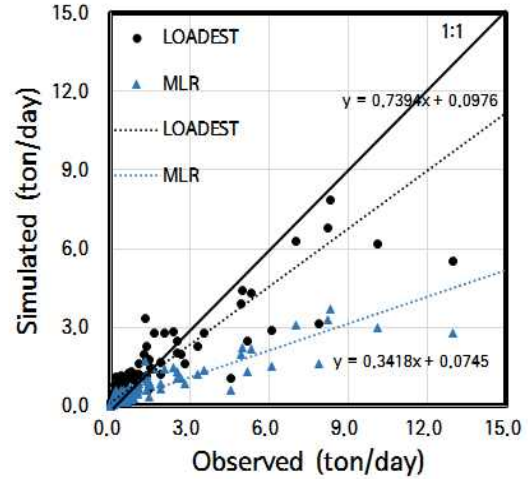
구역		가평A	한강A	내성B	보청A
LOADEST	R^2	0.77	0.93	0.69	0.90
	NSE	0.70	0.89	0.55	0.82
	RSR	0.54	0.33	0.67	0.42
	PBIAS	-27.36	-6.74	27.67	-14.46

<표 3-1-34> LOADEST 및 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 추정모형 통계적변량 (계속)

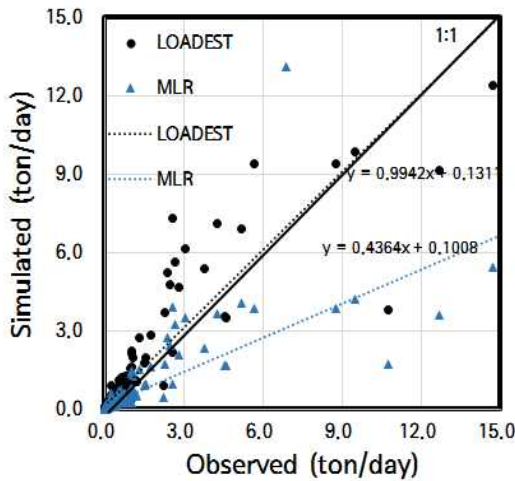
유역		가평A	한강A	내성B	보청A
MLR	R ²	0.76	0.93	0.64	0.88
	NSE	0.87	0.54	0.56	0.78
	RSR	0.36	0.68	0.66	0.47
	PBIAS	38.00	-51.06	-34.64	4.54



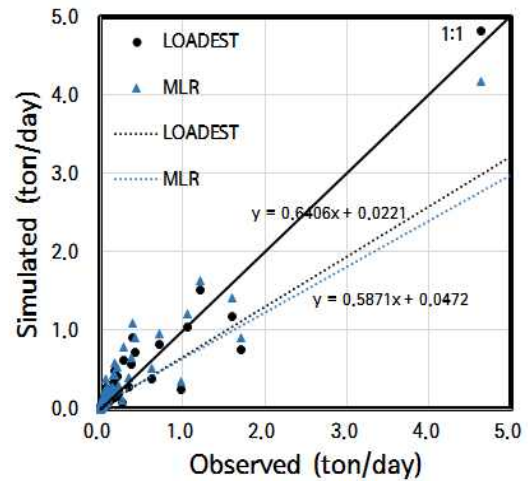
(a) 가평A



(b) 한강A



(c) 내성B



(d) 보청A

(그림 3-1-31) 다중회귀분석에 의한 T-P 부하량 LOADEST 모의치와 실측치의 산포도

4.2. 원단위법

가. 원단위법 개요

원단위법은 각 오염원별 원단위와 배출율 및 오염물질 제거율을 이용하여 해당 오염원의 오염부하량을 산정하는 방법으로, 여러 오염원별 원단위 부하량 산정에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 이루어져 왔다. 국립환경과학원 (2012)은 개정된 수계오염총량관리기술지침을 발표하여 각종 토지이용 및 산업에 따른 원단위 산정 방법과 원단위 부하량을 제시하였다. 원단위 부하량은 생활계, 축산계, 산업계, 토지계, 양식계

및 매립계로 구분하여 산정하였으며, 분류별로 자세한 산정 방법이 제시되어 있다.

(1) 생활계

① 가정인구의 발생부하량은 가정인구에 발생부하원단위를 곱하여 산정한다.

$$\text{가정인구발생부하량} = \text{가정인구수} \times \text{가정인구발생부하원단위}$$

$$\text{가정인구분뇨발생부하량} = \text{분뇨발생부하비} \times \text{가정인구발생부하량}$$

$$\text{가정인구잡배수발생부하량} = (1 - \text{분뇨발생부하비}) \times \text{가정인구발생부하량}$$

<표 3-1-35> 생활계 가정인구 발생부하 원단위 및 분뇨발생부하비

구 분	가정인구 발생부하원단위(g/인/일)			분뇨발생부하비		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
시 가	50.7	10.6	1.24	0.45	0.8	0.8
비시가	48.6	13.0	1.45			

② 영업인구의 발생부하량은 오수발생유량에 오수발생농도를 곱하여 산정하고, 오수발생농도에 대한 실측자료가 없는 경우 표준발생농도를 곱하여 산정한다. 단, 영업장의 종류가 다양하고 각 업종의 물사용량 구분이 어려운 경우에는 해당 업종 오수발생농도의 평균을 적용한다. 생활계 영업장 오수발생 표준농도는 부록에 제시하였다.

$$\text{영업인구발생부하량} = \text{영업인구오수발생유량} \times \text{영업인구오수발생농도}$$

$$\text{영업인구분뇨발생부하량} = \text{분뇨발생부하비} \times \text{영업인구발생부하량}$$

$$\text{영업인구잡배수발생부하량} = (1 - \text{분뇨발생부하비}) \times \text{영업인구발생부하량}$$

③ 생활계 발생부하량은 가정인구와 영업인구에 의한 발생부하량을 합하여 산정한다.

$$\text{생활계발생부하량} = \text{가정인구발생부하량} + \text{영업인구발생부하량}$$

$$\text{생활계분뇨발생부하량} = \text{가정인구분뇨발생부하량} + \text{영업인구분뇨발생부하량}$$

$$\text{생활계잡배수발생부하량} = \text{가정인구잡배수발생부하량} + \text{영업인구잡배수발생부하량}$$

(2) 축산계

축종별 사육두수에 발생부하 원단위를 곱하여 산정한다.

$$\text{축산폐수발생부하량} = \sum(\text{축종별사육두수} \times \text{축종별축산폐수발생부하원단위})$$

$$\text{축산고형물발생부하량} = \sum(\text{축종별사육두수} \times \text{축종별축산고형물발생부하원단위})$$

$$\text{축산계발생부하량} = \text{축산폐수발생부하량} + \text{축산고형물발생부하량}$$

<표 3-1-36> 축산분뇨 발생부하원단위

(단위: g/두/일)

항목	구분	젖소	한우	말	돼지	양·사슴	개	가금
BOD	합계	556	528	259	109	10	18	5.2
	폐수	117	67	30	32	3	4	0
	고형물	439	461	229	77	7	14	5.2
T-N	합계	161.8	116.8	77.6	27.7	5.8	8.4	1.1
	폐수	63.5	40.0	26.7	14.9	4.2	5.4	0
	고형물	98.3	76.8	50.9	12.8	1.6	3.0	1.1
T-P	합계	56.7	36.1	24.0	12.2	0.9	1.6	0.4
	폐수	10.7	3.5	2.3	3.3	0.2	0.3	0
	고형물	46.0	32.6	21.7	8.9	0.7	1.3	0.4

(3) 산업계

폐수발생유량에 발생농도를 곱하여 산정한다. 발생농도는 실측치 또는 업종별 표준 발생농도로 한다(업종별 발생농도가 없는 경우 유사업종의 원단위를 적용한다). 업종별 산업폐수 표준발생농도는 부록에 제시하였다.

$$\text{산업계발생부하량} = \sum(\text{업종별폐수발생유량} \times \text{업종별폐수발생농도})$$

(4) 토지계

① 토지계의 발생부하량은 유량과 수질을 연속 측정하여 수문곡선(hydrograph)과 오염부하곡선(pollutograph)을 도출하여 이로부터 월별 부하량을 산정한다.

② 토지계 발생부하량에 대한 실측조사가 어려울 경우에는 지목별 면적과 연평균 발생부하원단위를 이용하여 연평균 발생부하량을 산정할 수 있다.

$$\text{토지계발생부하량} = \sum(\text{지목별면적} \times \text{지목별연평균발생부하원단위})$$

<표 3-1-37> 토지계 지목별 연평균 발생부하원단위

(단위: kg/km²·일)

지목	BOD	T-N	T-P
전	1.59	9.44	0.24
답	2.30	6.56	0.61
임야	0.93	2.20	0.14
대지	85.90	13.69	2.10
기타	0.960	0.759	0.027

- '전'은 지목별 면적 중 전, 과수원을 포함
- '답'은 지목별 면적 중 답
- '임야'는 지목별 면적 중 임야
- '대지'는 대지, 공장용지, 학교용지, 도로(도로사면 제외), 철도용지(철도선로 제외), 주차장, 주유소용지, 창고용지, 체육용지(골프장, 스키장 제외), 유원지, 종교용지, 사적지를 포함
- '기타'는 광천지, 염전, 제방, 하천, 구거, 유지, 양어장, 수도용지, 공원, 묘지, 목장용지, 잡종지를 포함
- 하천부지 점용용지는 토지이용형태에 따라 해당 지목에 산입함

③ 토지계 발생부하량 산정시 해당지역에 적합한 유역모델을 적용하여 발생부하량을

산정·검토할 수 있으며, 적용된 모델의 타당성 및 적합성이 인정될 경우 차기 오염총량관리 계획수립단계부터 활용할 수 있다.

(5) 양식계

① 사료투여량 자료가 확보된 경우 양식장의 월별 사료투여량(kg/월)에 발생부하비를 곱하여 월별로 산정한다.

$$\text{양식계발생부하량} = \frac{\text{발생부하비} \times \text{월사료투여량}}{\text{월간일수}(=28,29,30,31)}$$

② 사료투여량 자료 미확보시 양식장의 시설면적에 시설면적기준 발생부하원단위를 곱하여 산정한다.

$$\text{양식계발생부하량} = \text{시설면적} \times \text{발생부하원단위}$$

<표 3-1-38> 양식장 발생부하 원단위 (단위 : g/m²/일)

월	가두리(이스라엘잉어)			지수식(띠꾸라지)			유수식(송어)			유수식(대하)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
1월	2.35	0.46	0.13	0.00	0.00	0.00	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
2월	1.93	0.38	0.10	0.00	0.00	0.00	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
3월	2.43	0.47	0.13	0.50	0.10	0.03	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
4월	24.16	4.71	1.31	2.49	0.48	0.13	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
5월	37.08	7.23	2.01	3.63	0.70	0.19	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
6월	109.04	21.27	5.90	10.68	2.07	0.56	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
7월	146.67	28.61	7.93	14.36	2.78	0.76	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
8월	155.67	30.36	8.42	15.24	2.95	0.81	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
9월	169.22	33.00	9.15	16.57	3.21	0.88	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
10월	149.39	29.14	8.08	14.63	2.83	0.77	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
11월	102.20	19.93	5.53	10.01	1.94	0.53	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
12월	20.06	3.91	1.08	0.00	0.00	0.00	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17
평균	76.68	14.96	4.15	7.34	1.42	0.39	15.31	2.99	0.83	3.18	0.62	0.17

<표 3-1-39> 양식장 사료투여량 대비 발생부하비

BOD ₅	T-N	T-P
0.25	0.05	0.013

(6) 매립계

폐기물 매립시설의 침출수 발생유량에 발생농도를 곱하여 월별로 산정한다.

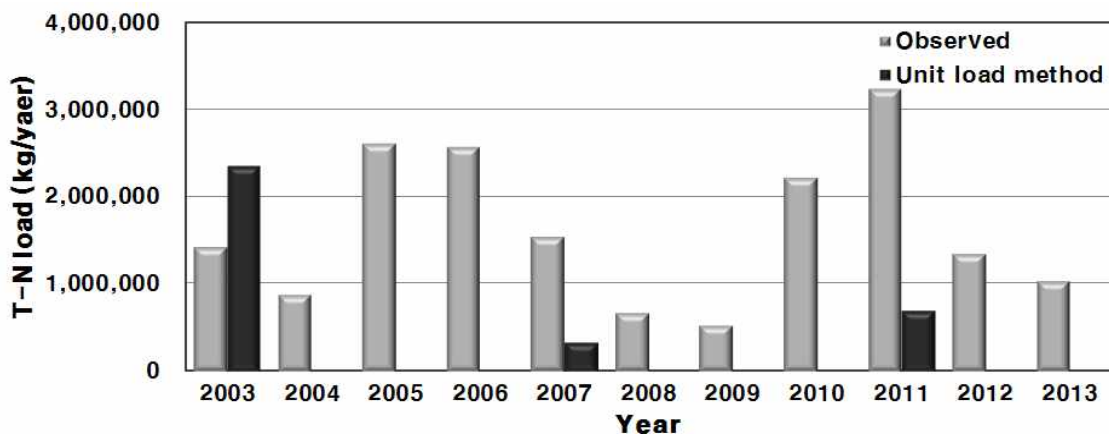
$$\text{매립계발생부하량} = \text{침출수발생유량} \times \text{침출수발생농도}$$

나. 원단위법 적용

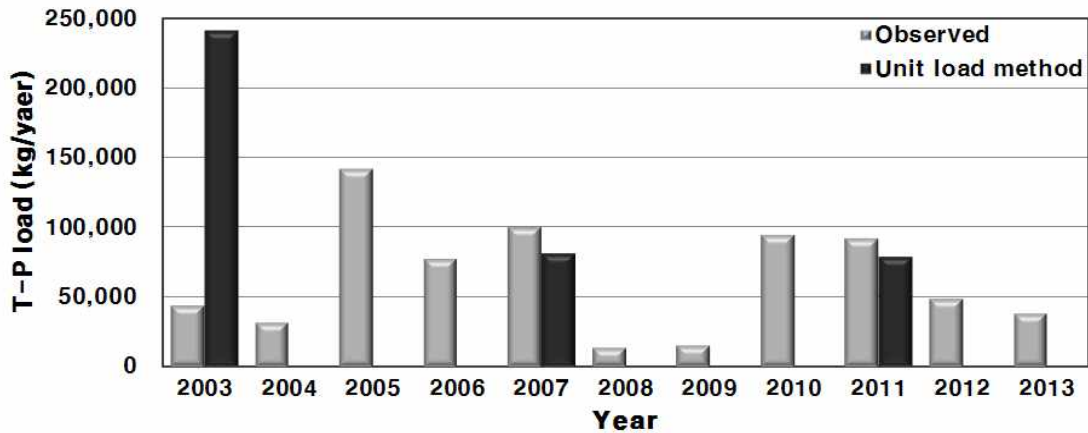
원단위를 이용하여 청미천 유역을 대상으로 총질소 (T-N), 총인 (T-P)부하량을 모의하였다. 청미천 유역은 본 장에서 연구대상으로 하는 저수지 상류유역이 아니지만, 원단위법을 이용한 수질모의 방식은 인구, 토지이용 등 유역 내의 통계자료에 기반하여 수질을 모의하기 때문에 통계자료의 신뢰성만 확보할 수 있다면 유량-부하량식에 의한 수질모의와 마찬가지로 대상유역의 위치 등 다른 특성은 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 청미수위관측소는 경기도 여주군 점동면 원부리 원부교에 위치한 관측소로, 청미천 유역에 위치하고 있고 유역면적은 525.6 km²이다.

청미천수계 하천정비기본계획 (2003, 경기도), 청미천수계 하천기본계획 (2008, 경기도) 및 청미천 하천기본계획(변경) 보고서 (2011, 국토해양부) 등의 자료를 바탕으로 원단위법에 의한 총질소, 총인 오염부하량을 산정하였으며, 원단위법에 의해 산정된 오염부하량은 실측 오염부하량과 비교하여 적용성을 분석하였다. 실측 오염부하량 계산을 위한 수문 및 수질자료는 환경부와 국립환경과학원에서 제공하는 물환경정보시스템 (Water Information System)의 데이터를 이용하였으며, 2003년에서 2013년까지 11개년의 유량 및 수질자료를 이용하여 연단위 오염부하량을 계산하였다.

(그림 3-1-32)와 (그림 3-1-33)은 청미천 유역의 2003년에서 2013년까지의 실측 총질소, 총인 연부하량과 2003년, 2007년 및 2011년 원단위법에 의해 계산된 총질소, 총인 연부하량을 나타내고 있다. 실측 총질소 및 총인 부하량은 535,312 kg/yea에서 3,239,191 kg/year, 14,082 kg/year에서 141,462 kg/year의 값을 나타내었으며, 연도별 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 원단위법에 의해 계산된 총질소, 총인 부하량은 각각 2003년에 2,352,159 kg/year, 240,911 kg/year, 2007년에 333,296 kg/year, 81,199 kg/year, 2011년에 698,939 kg/year, 78,585 kg/year로 나타났다. 원단위법에 의한 오염부하량 산정 방식은 계속해서 수정·보완되어오고 있으며, 연도별 오염부하량 산정 방식이 어느 정도 차이를 가진다. 이에 따라 2003, 2007, 2011년 각각의 인구, 가축두수, 토지이용 등의 변동이 크지 않음에도 오염부하량이 큰 차이를 보이는 것으로 사료된다.



(그림 3-1-32) 청미천 유역의 총질소 연부하량



(그림 3-1-33) 청미천 지역의 총인 연부하량

원단위법은 유역 내의 상세한 물순환 기작 및 변화를 적용할 수 없는 단점이 있다. 하지만 계측 데이터 없이도 수질 모의가 가능하다는 장점 때문에 수문 및 수질 계측망이 거의 구축되어 있지 않은 농업용 저수지 상류유역에는 가장 효과적인 수질 모의 방식이라고 할 수 있다. 또한, 농업용 저수지 상류유역은 대체로 산림, 농경지 등으로 이루어진 단순한 토지이용 구성을 가지기 때문에, 토지이용이 복잡한 유역에 비해 비교적 정확한 모의가 가능할 것으로 사료된다. 현재 원단위법에 의해 산정된 오염부하량과 실제 오염부하량의 오차를 줄이기 위한 연구는 다방면에서 진행되고 있다. 향후 개선된 연구 결과를 지속적으로 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용한다면, 보다 정확한 농업용 저수지 상류유역의 수질 예측이 가능할 것으로 기대된다.

5. 요약 및 결론

본 장에서는 COMFARM 기반 저수지 상류유역의 물순환 해석 모형을 구축하였고, 모형에 의한 모의 결과와 실측자료의 비교를 통해 그 적용성을 평가하였다. 본 장의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 저수지 상류유역 물순환 해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework가 COMFARM에 내재되어 구동되며 자료관리시스템 AWR-DMS와 연동하여 전처리를 수행하며 매개변수최적화, 유역증발산량, 유출량, 오염부하량 등의 자료를 후처리시스템을 통해 그래프, 표, 보고서 등의 형태로 출력하여 제공한다.
- ② 저수지 상류유역의 유출량은 수정 3단 Tank 모형을 이용하여 모의하며 매개변수 추정을 위해 30개 유역을 대상으로 유역경사에 따른 매개변수 추정 지역화식을 개발하였다. 대상유역의 유역경사 평균값과 표준편차를 이용하여 유역경사 구간을 Case I 과 Case II로 구분하여 개발하였다. 각 Case 별 통계적 변량은 R^2 와 효율지수는 유사하게 나타났으나, Case II의 지역화식을 적용하였을 때 모의된 총 유출량이 실측 총 유출량에 좀 더 근접하게 모의되어 RMSE는 낮게 나타났다.

- ③ 기존에 제시된 지역화식과 최적화 기법을 통해 산정된 모의치와 실측치를 개발된 지역화식에 따라 산정된 모의치와 비교함으로써 개발된 매개변수 지역화식의 적용성을 평가하였다. 개발된 지역화식은 홍수기 유출에서 실측치에 비해 과소모의되는 것으로 나타났으며, 최적화된 매개변수에 비해 낮은 통계적 변량을 나타냈으나 기존의 지역화식과는 유사한 결과로 나타났다.
- ④ Tank 모형의 모의능력을 검토하기 위해 준분포형 모형인 SWAT 모형의 모의치와 비교·평가하였다. Tank 모형은 통계적 변량을 통해 SWAT 모형에 비해 실측치와 유사하게 모의하는 것으로 나타났으나 갈수기에 과다 모의하는 경향을 보였다. 연평균 유출량은 Tank 모형은 실측치에 비해 과다 모의되는 경향을, SWAT 모형은 과소 모의되는 경향을 보였으나 두 모형 모두 유사한 범위 내에서 모의되었다.
- ⑤ 미계측 유역의 오염부하량 추정을 위해, 수질 및 유량 자료를 확보하고 있는 수질오염총량제 실시유역 81개를 대상으로 LOADEST 회귀모형의 유역별 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석을 이용하여 토지이용, 유역면적, 유로연장 등 유역특성인자에 따른 매개변수 추정방법을 개발하였다
- ⑥ 오염부하량 모의를 위한 회귀모형으로 T-N은 LOADEST의 5번 회귀모형을, T-P는 3번 회귀모형을 선택하였다. 유역별로 선택된 회귀모형의 최적매개변수를 추정하였으며, 매개변수를 이용하여 오염부하량을 모의하였다. 모의결과 T-N 부하량의 R^2 는 0.65 ~ 0.99, NSE는 0.01 ~ 0.99, RSR은 0.12 ~ 0.97, PBIAS는 -86.46 ~ 16.77의 범위로 나타났으며, T-P 부하량의 R^2 0.42 ~ 0.96로, NSE 0.22 ~ 0.91, RSR 0.30 ~ 0.88, PBIAS -65.05 ~ -2.13의 범위로 나타나 LOADEST 기반의 최적 매개변수가 실측치를 잘 반영할 수 있는 것으로 나타났다.
- ⑦ 회귀모형 매개변수 추정방법의 개발을 위해, 다중회귀분석과 기법을 이용하였다. 유역특성과 최적매개변수간의 다중회귀분석을 실시하여 매개변수추정 회귀식을 개발하였으며, 개발된 회귀식을 통해 매개변수를 산정하여 오염부하량을 모의하였다. 모의결과, T-N 부하량 결과는 R^2 는 0.64 ~ 0.98, NSE는 -0.34 ~ 0.97, RSR은 0.19 ~ 1.16, PBIAS는 -67.64 ~ 132.65의 범위로 나타났으며, T-P 부하량 결과는 R^2 는 0.47 ~ 0.96, NSE는 -0.47 ~ 0.93, RSR은 0.26 ~ 1.21, PBIAS는 -81.46 ~ 134.74의 범위로 나타나, 일부 유역을 제외하고는 다중회귀분석에 의해 도출된 회귀식이 매개변수 추정에 적용가능한 것으로 나타났다.

본 장에서 개발한 저수지 상류유역 물순환 해석기법은 농업용수 물순환 종합해석 모형의 저수지 상류유역 물순환 부모형으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

제 2 절 농업용 저수지 물순환 해석기법의 개발 및 적용

1. 서론

오늘날, ICOLD (International Commission on Large Dams)에 등록된 댐 및 저수지들의 약 49%가 농업용수 공급을 위해 운영되고 있으며, 관개는 전세계 저수지의 운영 기준 중 가장 주요한 목적인 것으로 보고되고 있다 (ICOLD, 2007). 우리나라는 전체 면적 중 약 80%가 수리시설물을 통해 공급받고 있으며, 이 중 약 58%가 농업용 저수지로부터 농업용수를 공급받고 있다 (농림축산식품부, 2014).

농업용 저수지의 운영은 수자원 관리의 중요한 요소로 효율적인 관개는 지역의 지속 가능한 발전에 이바지 한다 (Reddy and Kumar, 2008; Karamouz and Araghinejad 2008). 기후변화 등 여건변화로 인한 물 부족에 대비하여 효율적인 농업용 저수지 수량 관리 및 합리적인 용수 공급 전략 수립이 중요하며, 이를 위해 많은 이해관계자들은 저수지 물수지 분석 방법을 이용하고 있다 (Fowe et al., 2015). 저수지 유역은 저수지/저수지 상류유역/저수지 하류유역의 물순환이 복합적으로 연계되어 복잡하며 (송정현, 2013; 송정현 등 2013a; 송정현 등, 2015b), 저수지의 수문·수질 요소를 분석하기 위해서는 저수지 유입량 및 유입부하량, 저수량 및 저수지 수질, 농업용수 공급량, 그리고 수문 및 물넘이 방류량 등을 모의 후 통합적으로 연계할 필요가 있다 (Bhadra et al., 2009).

국외의 저수지 운영 모형으로는 작물의 수에 따라 단일 작물 관개를 위한 모형 (Dudley et. al., 1971; Dudley and Burt 1973; Bras and Cordova 1981)과 두 개 이상 작물의 관개를 위한 모형 (Vedula and Nagesh Kumar 1996; Nagesh Kumar et al. 2006; Ashofteh et al. 2013) 등이 개발된 바 있다. 하지만 국외 모형은 주로 토양수분 물수지 식 기반의 밭작물 관개를 위해 개발되었기 때문에 우리나라와 같이 논 관개를 위해 저수지를 운영하는 지역에서는 적용할 수 없다. 밭과 달리 논은 물꼬가 존재하여 담수 상태를 유지하는 영농활동이 이루어지기 때문에, 논 담수기작이 저수지 물수지 모형에 반영될 필요가 있다. 여러 선행 연구자들은 논 담수기작을 반영한 저수지 물수지 모형을 이용하여 저수지를 운영 및 관리하는 연구를 수행한 바 있다 (Panigrahi and Panda 2003; Yoo et al. 2013; Kang and Park 2014; Nam et al. 2015; Fowe et al. 2015). 하지만 기존의 연구에서는 저수지 물수지 모의 관련 주요 매개변수에 대한 민감도 분석, 보정 및 검정에 관한 연구는 미흡했다. 즉, 매개변수를 어떠한 값을 선정 하느냐에 따라 모의 결과는 크게 달라질 수 있으나 이에 대한 고려 및 정량적 평가가 부족했다 (송정현 등, 2015b).

농업용 저수지의 물수지 및 수질은 인간의 영향에 의한 매개변수와 물리적 매개변수가 복합적으로 영향을 미친다 (Georgiou and Papamichail, 2008). 이러한 매개변수는 관개지구 특성과 관련된 매개변수 (토양 특성, 관개 효율), 영농방법과 관련된 매개변수 (물꼬 높이, 최소담수심 등), 저수지 운영과 관련된 매개변수 (관개기, 중간낙수기, 제한수위 운영시기)들로 이루어져 있다. 이들 매개변수는 임의적이고 정확하지 않아 많은 불확실성을 내포하고 있다 (Suresh and Mujumdar, 2004). 따라서 어떠한 매개변수가 농업용 저수지의 물수지 및 수질에 민감하게 영향을 미치는지 분석할 필요가 있

다. 또한, 농업용수 공급량 모의 결과는 이들 매개변수 값으로 어떠한 값을 선택/이용 했는가에 따라 그 차이가 상당히 크게 나타나나, 매개변수 선정에 관한 기준이 모호하며 불확실성이 크다 (Yoo et al., 2013). 따라서, 저수지 물수지 분석 이전에 실측 결과와 모의 결과를 비교를 통한 매개변수의 보정 및 평가가 필요하다.

특히, 관개효율 매개변수는 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이 모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다 (임상준 등, 2000b; Kim et al., 2005; 송정현 등 2015b). 관개효율의 작은 변화는 저수지 물수지 성분에 크게 영향을 미칠 가능성이 있다. 하지만, 많은 연구에서 시간의 변화에 따른 관개효율 변화를 고려하지 않고 고정된 값을 이용하고 있다 (Ali et al. 2003; Georgiou and Papamichail 2008; Yoo et al. 2013; Kang and Park 2014; Nam et al. 2015; Fowe et al. 2015). 이러한 경우 시간에 따라 매개변수 값이 변하도록 구성하는 것이 한 방안일 수 있다 (Wu and Chen, 2012). Kangrang and Chaleeraktragoon (2007)은 또한 관개효율이 연단위로 변하도록 구성하는 것이 고정된 값보다 모의 결과가 더 우수하게 나타났다고 보고한 바 있다.

추가적으로 농업용 저수지 운영규칙을 우리나라의 여건 변화에 따라 재조정할 필요가 있다. 전통적으로 전세계 대부분의 저수지는 단일 목적으로 건설되었으나, 오늘날 많은 저수지가 홍수조절, 환경용수 공급, 레크레이션 등 여러 목적으로 이용되고 있다 (ICOLD, 2007; Li, 2010). 우리나라의 저수지 운영 목적은 농업용수 공급을 위한 단일 목적에서 최근에 홍수조절의 목적이 추가되었다. 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 수위조절장치 (수문)가 있는 저수지에 대하여 용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 제한수위를 설정하여 운영하도록 규정되어 있다. 제한수위의 설정은 기존의 만수위보다 낮은 저수지 수위를 유지함에 따라 저수지 하류 하천으로 방류되는 수량이 증가할 수 있다. 즉, 제한수위를 실제로 운영하는 지역에 대해 이를 고려하지 않고 저수지 물수지 요소를 모의하면 모의 결과가 실제 결과와 상이할 수 있다. 따라서 과거의 규칙에서 현재의 여건을 고려한 새로운 운영 규칙을 개발하여 대체할 필요가 있다.

농업용 저수지의 수질은 농업용수 및 하류하천의 수질에 직접적으로 영향을 미친다. 최근에는 삶의 질 향상으로 친수활동이 증가하면서 하천의 경관, 수질 생태보전 등 저수지의 환경적 기능에 대한 관심과 이의 개선에 대한 사회적 요구도 증가하고 있다 (지용근 등, 2012). 따라서 농업용 저수지 수질의 개선 및 관리가 필요하며, 이를 위해서는 현재수질의 정확한 평가와 미래 수질 변화에 대한 예측이 필수적이다 (함중화 등, 2012).

저수지 수질 해석을 위한 대표적인 수체모형으로는 WASP, QUAL2E, EFDC 등의 모형이 있다. 이들 모형들은 수체에서 일어나는 수질과정의 시공간적변화를 구체적으로 모의하기 위해서 개발된 모형으로 많은 입력자료와 모의과정을 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 모형과 달리 BATHTUB, EUTROMOD 모형 등 적은 양의 입력자료로 수체의 수질을 간단하게 모의할 수 있는 모형도 있다. 이들 모형은 수체의 특성 및 수질과정을 크게 단순화 시켜 묘사하고 이를 바탕으로 수체전체의 평균적이고 장기적인 수질을 모의하는 반면, 많은 가정이 필요하여 결과적으로 모의결과의 불확실성이 커질 가능성이 높다.

우리나라의 경우 전국 농업용 저수지의 4.7 %인 825개소만이 수질측정망으로 지정

되어 정기적으로 수질조사를 실시하고 있어 전체적으로 모델 구축 및 보정을 위한 저수지 내 실측 수질자료가 충분하지 않은 실정이다 (함중화 등, 2012). 따라서 농업용 저수지 수질모의를 위해 복잡한 모형을 사용할 경우, 입력자료 구축 과정에서 상당한 가정이 필요하게 되어 결과적으로 모형의 결과에 불확실성이 커지고 모의 결과에 신뢰성이 낮아지게 된다. 이에 비교적 간단한 방법을 사용하는 것이 우리나라의 농업용 저수지 수질 모의에 더 효율적이라고 할 수 있다.

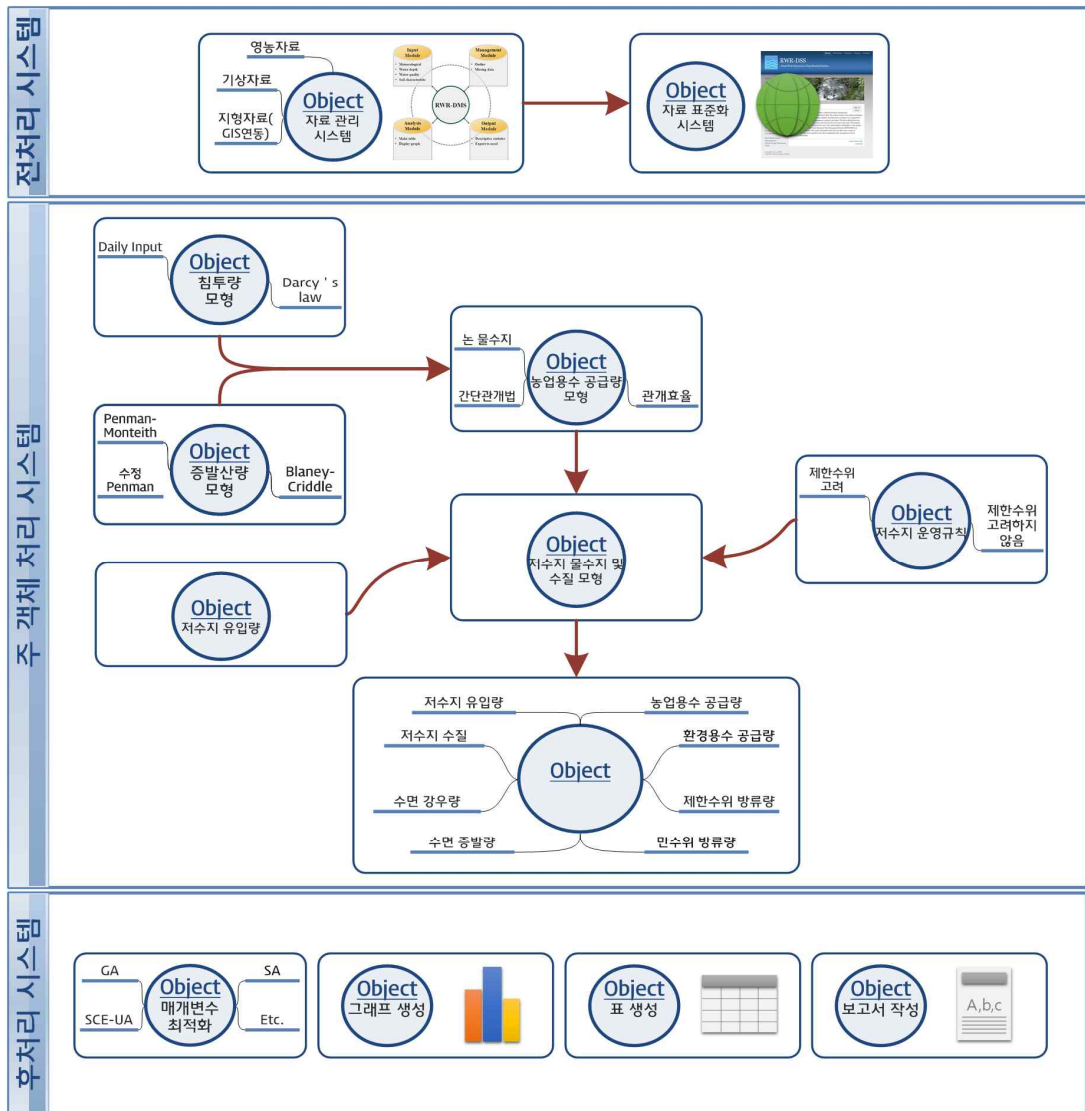
저수지의 물수지 및 수질을 해석하기 위한 시스템이 개발되면 그 시스템이 실제 현장에서 운영되는 저수지의 유입 및 유출 기작과 비교하여 유사한지를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 ① 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성, ② 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용, ③ 홍수기 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 고려한 저수지 물수지 해석 모형의 개발 및 적용, 그리고 ④ ARSIM_rev, BATHTUB, EUTROMOD 모형 기반 농업용 저수지 수질해석 기법의 정립 등을 수행하고자 한다.

2. 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성

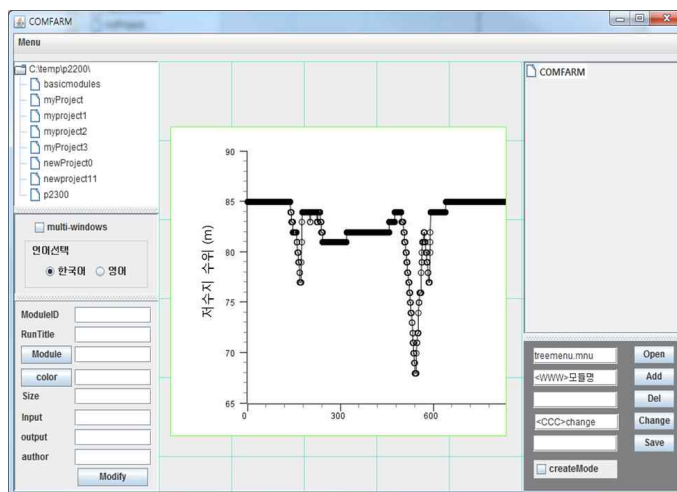
본 연구에서 개발한 농업용 저수지 물순환 해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COMponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)에 내재되어 구동이 되도록 개발하였다. COMFARM에 대한 자세한 설명은 [제 3 장 제 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

(그림 3-2-1)은 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성을 보여주고 있다. 모형은 COMFARM의 전처리 시스템인 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 데이터베이스에서 제공하는 시간·공간·영농자료를 통해 입력 자료를 쉽게 구축할 수 있다. AWR-DMS에 관한 자세한 설명은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다. 모형의 주 객체 처리 시스템에서는 저수지의 수문 및 수질을 해석하기 위한 요소기술이 내재되어 있다. 저수지 물수지를 모의하기 위해 저수지 유입량은 [제 3 장 제 1 절]에서 개발된 수정 3단 Tank 모형과 매개변수 지역화식으로 산정된 유출량 출력자료를 입력받는다. 농업용수 공급량은 증발산량 모형과 침투량 모형과 연동되어 논에서의 물수지식, 최소담수심 이용 관개량 산정 방법, 그리고 관개효율 매개변수를 이용하여 모의한다. 여기서 증발산량 성분은 Penman-Monteith 식, 수정 Penman 식 중 사용자가 선택하여 이용할 수 있으며, 침투량 성분은 사용자가 직접 입력하거나 Darcy's law 등을 이용하여 모의할 수 있도록 구축되어 있고 관련 입력자료는 AWR-DMS와 연동된다. 저수지 물수지 모형 및 수질 모형에서는 농업용수 공급량 및 저수지 유입량을 입력받아 저수지 운영규칙에 따라 물수지 및 수질 성분이 모의된다. 저수지 운영규칙은 비상 수문이 설치되어 홍수기 제한수위를 운영할 수 있는 저수지와 수문이 설치되지 않아 제한수위를 운영하지 못하는 저수지로 구분되어 있다. 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 모의 결과인 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 환경용수 방류량, 수면 강우량, 수면증발량, 저수지 수질은 COMFARM의 후처리시스템을 통해 그래프, 표, 보고서 작성 컴포넌트를 통해 출력할 수 있다. 또한 매개변수 최적화 컴포넌트에서는 실측 자료를 보유하고 있는 모의 요소에 대해 매개변수를 통해 자동보정 및 검정을 수행할 수 있다. (그림 3-2-2), (그림

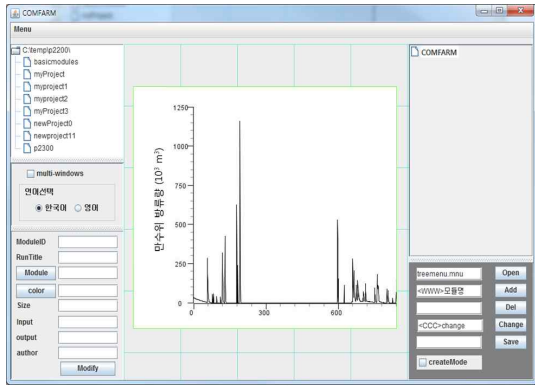
3-2-3)은 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 결과를 보여주고 있다.



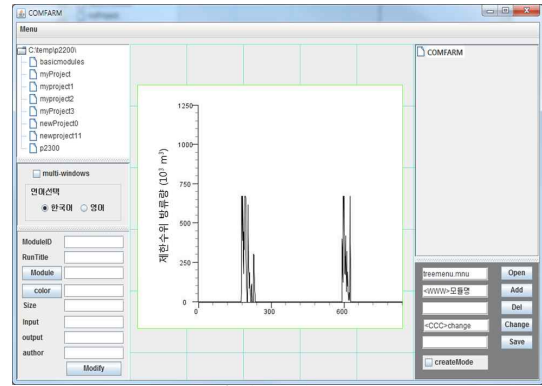
(그림 3-2-1) COMFARM기반 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 구성



(그림 3-2-2) 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 화면 (1)



(a) 만수위 방류량



(b) 제한수위 방류량

(그림 3-2-3) 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 화면 (2)

3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용

농업용수 공급량 (agricultural water supply)은 관리자가 수리시설물에서 관개지구로 실제로 공급하는 용수량을 의미하며 농경지에서 작물재배를 위해 이용되는 필요수량 (irrigation water requirement), 수로에서 손실되는 송수 손실 수량 (conveyance loss), 그리고 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀하는 배분관리 용수량 (delivery management water requirement)을 포함한다 (송정현, 2013; 송정현 등, 2013a).

우리나라의 농업용수 이용량은 하천유지용수를 제외한 물 사용량의 약 62%인 159억 m^3 로 수자원 이용의 많은 부분을 차지하고 있다 (국토해양부, 2011). 2013년 기준 논 면적의 80.6%는 수리시설물로부터 용수를 공급받고 있으며, 이 중 58.4%의 면적을 저수지가 공급하고 있다 (농림축산식품부, 2014). 농업용 저수지는 관개 후 수위가 내려가고, 상류유역의 유출량이 유입되어 다시 수위가 상승한다. 저수지 하류 관개지구로 공급된 용수량은 전량 작물에 의해 소비되는 것이 아니며, 약 32~86%가 포장에서 소비되지 않고 하천으로 회귀되어 하천유량을 구성하는 중요 성분이 된다 (송정현 등, 2015a). 이와 같이 농업용수 공급은 관개지구의 수문 순환과 비관개지구의 수문 순환, 그리고 수리시설물의 저수량 등과 복합적으로 연계되어 상·하류의 하천 유황에 영향을 미친다.

농업용수 공급량과 관련된 연구는 농업용 저수지의 용수공급능력과 수요량을 고려하여 저수지의 물 공급 취약성을 평가하는 연구 (남원호 등, 2012)가 수행된 바 있다. Yoo et al. (2013)은 기후변화와 이에 따른 토지이용 및 생육시기 변화를 고려하여 미래 농업용 저수지 수요량을 산정하였다. 여기서, 관개효율은 지역별 특성을 고려하여 저수지별로 80~90%가 적용되었으며 시간에 따른 변화는 고려되지 않았다. 또한, 송정현 등 (2013a)은 농업용수 공급량 모형과 논 광역 배수량 모형을 연계하여 복합영농 관개지구의 배수량을 모의하였으며, 여기서 송수 효율은 95%, 그리고 배분 효율은 현장의 실측치를 반영하여 73%가 적용된 바 있다. 이상의 연구들은 농업용수 공급량에 대한 정확한 추정이 기반되어야 하며, 이는 장래 용수수요 추정, 용수수급 계획, 관개 조직의 운영 등 수자원 관리 계획 수립에 있어 중요한 요소로 작용한다.

농업용수 공급량 조사를 위한 가장 정확한 방법은 용수로의 시점부에 장비를 설치하여 연속 측정하는 것이다. 최근에는 농촌수자원 스마트 물관리를 위하여 첨단 센서 네트워크를 이용하여 실시간으로 농업용수 공급량을 측정하는 지역이 있으나 (박창언 등,

2012; 남원호 등, 2013), 모니터링 방법은 우리나라 수리시설물의 수, 이용범위의 광범위성, 여러 곳에 산재되어 있는 특성을 고려하면 현실적으로 불가능하다 (Im et al., 2000).

일반적인 용수 공급량 조사 방법은 필요수량을 모의 후 관개효율을 고려하여 산정하는 것이다. 하지만 실제 공급량은 수리시설물 관리자가 주민의 요구 및 관행적인 경험을 고려하여 운영하는 것이지(남원호 등, 2011), 필요수량을 모의 후 용수 공급을 결정하는 것이 아니다. 따라서 필요수량 기반으로 추정되는 용수 공급량이 실측 공급량을 반영하는지에 대한 평가 및 연구가 필요하다.

기존의 용수수요량 추정방법은 농림부 (1997)에서 제시하는 방법을 이용하는데, 이용직 등 (2006)에 따르면 기존 작부시기가 현장의 물관리를 반영하지 않아 4~5월의 실측 공급량이 모의 공급량에 비해 5배 이상 차이가 나타나는 것으로 보고하였다. 이를 개선하기 위해 농업기반공사 (2005)와 주육종 등 (2006)은 기존에 적용되던 작부시기(농림부, 1997)에서 논물가두기 시기를 추가하여 담수가 4월부터 시작되도록 수정하였으며, 이 시기에 증발 및 침투에 의한 필요수량이 모의가 되도록 개선하였다. 또한 중간낙수 시기에 용수 공급이 중단되는 기작을 추가하였다. 송정현 등 (2013a)과 강민구 등 (2014)은 이와 같은 개선된 방식 (농업기반공사, 2005; 주육종 등, 2006)을 이용하여 공급량을 모의한 결과, 영농초기와 중간낙수기의 모의치가 기존 방식에 비해 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 보고하였다. Im et al. (2000)는 수정 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)의 저수율 모의 결과와 실측 저수율이 일치되도록 조정하는 방류계수 매개변수를 도입하여 농업용수 공급량을 산정하는 방법을 개발하였으나, 논물가두기와 중간낙수 시기를 고려하지는 않았다. 이상과 같이 농업용수 공급량은 수리시설물 관리자의 운영에 의해 결정되는 인위적 요소이나, 필요수량 기반으로 모의하기 위하여 작부시기를 개선하거나 새로운 매개변수를 도입하는 연구가 이루어져왔다. 하지만 기존의 연구에서는 공급량 모의 관련 주요 매개변수에 대한 민감도 분석, 보정 및 검정에 관한 연구는 미흡했다. 즉, 물꼬 높이, 침투량, 최소 담수심, 그리고 관개효율 매개변수를 어떠한 값을 선정하느냐에 따라 모의 결과는 크게 달라질 수 있으나 이에 대한 고려 및 정량적 평가가 부족했다. 특히, 관개효율 매개변수는 기상, 저수지 관리자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등의 영향을 받아 해마다 달라지는 것으로 보고되고 있으며 적절한 값의 선택이 모의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다 (임상준 등, 2000b; Kim et al., 2005). 따라서 주요 매개변수에 대한 민감도 분석과 보정된 매개변수가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 정량적 평가를 수행할 필요가 있다. 또한, 공급량 실측치가 확보되지 않은 경우 보정 및 검정을 수행할 수 없기 때문에 문헌에 제시되는 매개변수 값을 이용하게 되는데, 이에 따른 모의 결과가 실측치를 잘 반영하는지에 대한 평가 또한 필요할 것이다.

본 연구에서는 필요수량 기반으로 추정된 용수 공급량이 실제 공급량의 경향을 잘 반영하여 모의될 수 있도록 민감도 분석을 수행하여 주요 매개변수를 도출하고, 주요 매개변수 중 시간에 따라 변하는 매개변수의 경우 이를 고려하여 보정 및 검정 후 정확도를 평가하고자 한다. 그리고 보정하지 않고 문헌에서 제시된 매개변수를 이용하여 모의한 결과를 실측 결과 및 최적 모의 결과와 비교하여 최적 매개변수 선정의 중요성을 평가하고자 한다.

3.1. 농업용수 공급량 모의 기법

농업용수 공급량은 필요수량과 관개효율 (irrigation efficiency)을 고려하여 식 (3-2-1)과 같이 계산한다.

$$AWS_i = \frac{A_{rice}}{Es} \frac{IR_i}{1000} \text{ for } AWS_i \leq AWS_{max} \quad (3-2-1a)$$

$$AWS_i = AWS_{max} \text{ for } AWS_i > AWS_{max} \quad (3-2-1b)$$

여기서, AWS 는 농업용수 공급량 (m^3), A_{rice} 는 관개면적 (m^2), IR 은 필요수량 (mm), Es 는 관개효율 (%), AWS_{max} 는 일 최대 공급량 (m^3), 그리고 i 는 시간 간격 (day)이다.

본 연구에서의 관개효율은 (1-시설관리 손실률)을 의미하며, 송수효율과 배분효율의 곱으로부터 산정할 수 있고, 반복이용수량은 고려하지 않았다. 송수효율은 송수 손실 수량과, 그리고 배분효율은 배분관리 용수량과 관계된다. 배분관리 용수량이란 용수의 원활한 배분관리를 위하여 여분으로 공급하는 수량으로, 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀되는 수량으로 용수로 배수량이라고도 한다 (정하우 등, 2006; 송정현 등, 2013a). 관개효율은 기상, 지형, 수리시설물 운영자의 조작방식, 그리고 농민의 물 관리 방식 등에 따라 달라지며 우리나라의 경우 약 46~93%의 범위를 보이는 것으로 보고되고 있다 (Bos and Nugteren, 1990; Kim et al., 2005). 일 최대 공급량은 수리시설물의 제원 및 운영자의 조작방식에 따라 결정된다.

필요수량은 농업기반공사 (2005)와 주육종 등 (2006)이 제시한 변경된 필요수량 산정방식에 따라 논벼의 생육기를 논물가두기, 묘대기, 이앙기, 본답기, 그리고 중간낙수기 등과 같이 구분하여 산정하였다. 논물가두기, 묘대기, 그리고 이앙기의 필요수량 모의 방식은 강민구 등 (2014)에 상세히 서술되어 있다. 본 연구에서는 묘대 용수량 (NWR) 및 이앙 용수량 (TWR) 매개변수를 입력받도록 구성하였고, 중간낙수기에는 용수공급이 중단되도록 구성하였다. 본답기의 필요수량은 식 (3-2-2)와 같이 논에서의 물수지식을 기반으로 추정한다.

$$PD_i = PD_{i-1} + IR_i + ERAIN_i - (DR_i + ET_i + DP_i) \quad (3-2-2)$$

여기서, PD 는 담수심 (mm), IR 은 필요수량 (mm), $ERAIN$ 는 유효우량 (mm), DR 는 포장 배수량 (mm), ET 는 실제 증발산량 (mm), 그리고 DP 는 침투량 (mm)이다. 실제 증발산량은 FAO Penman-Monteith 식 (Allen et al., 1998)으로부터 추정된 잠재증발산량과 유승환 등 (2006)에 의한 논벼의 작물계수를 곱하여 산정하였다. 논에서의 침투량은 토양 특성에 따라 1~8.8 mm/day 의 범위로 보고되고 있으며 (Im et al., 2000; 송정현 등, 2013a), 산정방법은 Darcy's Law 및 연속방정식 등을 이용하여 물리적으로 계산하는 방법 (Khepar et al., 2000)과 일 침투량을 상수로 입력받아 모의하는 방법 (농림부, 1997)이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다. 포장 배수량은 식 (3-2-3a) ~ (3-2-3b)와 같이 일별 담수심과 물꼬 높이의 차가 전랑 당일에 배수되도록

구성하였다.

$$DR_i = PD_i - PD_{max} \text{ for } PD_i > PD_{max} \quad (3-2-3a)$$

$$DR_i = 0 \text{ for } PD_i \leq PD_{max} \quad (3-2-3b)$$

여기서, PD_{max} 는 물꼬 높이 (mm)이다. 물꼬 높이 매개변수는 순별로 변화도록 구성하는 방법 (Kang et al., 2006; Kim et al., 2009)과 일정하게 유지되도록 구성하는 방법 (농림부, 1997) 등이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다. 유효우량은 식 (3-2-4a) ~ (3-2-4c)와 같이 강우량과 당일의 배수량을 고려하여 산정하였다.

$$ERAIN_i = 0 \text{ for } RAIN \leq 5 \quad (3-3-4a)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i \text{ for } DR_i = 0 \quad (3-3-4b)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i - DR_i \text{ for } DR_i \geq 0 \quad (3-3-4c)$$

여기서, $RAIN$ 은 강우량 (mm)이다. 식 (3-2-4a)에서 강우량 5 mm 이하에서 유효우량이 0 mm인 이유는 벼잎에 의한 차단을 고려했기 때문이다 (농림부, 1997). 담수기간의 필요수량 모의방법은 물수지식으로 계산된 당일의 담수심이 최소담수심 이하로 내려가는 경우 당일의 담수심과 최소담수심의 차를 필요수량으로 간주하여 최소담수심을 유지하는 방법을 이용하였다 (식 (3-2-5a) ~ (3-2-5b)) (허유만 등, 1993).

$$IR_i = PD_{min} - PD_i \text{ for } PD_i < PD_{min} \quad (3-3-5a)$$

$$IR_i = 0 \text{ for } PD_i \geq PD_{min} \quad (3-3-5b)$$

여기서, PD_{min} 은 최소담수심 (mm)으로 농민이 논벼의 생육을 위해 최소로 유지하고자 하는 담수심이다. 최소담수심 매개변수의 입력은 순별로 변화도록 구성하는 방법 (허유만 등, 1993; Yoo et al., 2013)과 일정하게 유지되도록 구성하는 방법 (농림부, 1997) 등이 있으며, 본 연구에서는 후자를 이용하였다.

이상과 같이 농업용수 공급량 모의를 위해서는 모대용수량, 이양용수량, 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량, 그리고 관개효율 등의 매개변수가 입력 또는 모형의 보정 과정에서 이용되나, 이들 매개변수는 지역적 특성에 따라 그 범위가 다양하고 또한 정확한 정보를 얻기 어려운 특징을 가진다. 본 연구에서는 선행연구의 조사 결과를 바탕으로 공급량 모의 관련 대표 매개변수의 물리적 범위를 정리하였으며 <표 3-2-1>과 같다.

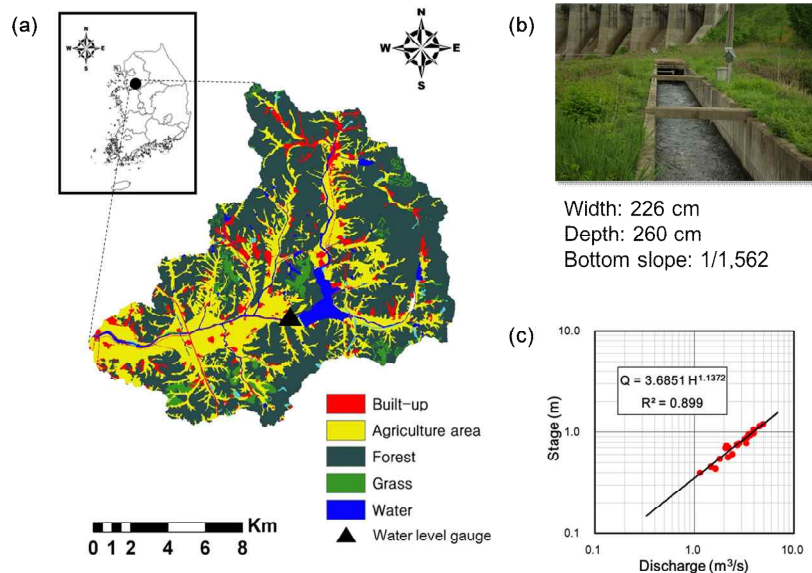
<표 3-2-1> 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수

매개변수	정의	범위	참고문헌
PD_{max}	물꼬 높이 (mm)	34.6~123.7	Kang et al. (2006)
PD_{min}	최소 담수심 (mm)	3.0~60.0	허유만 등 (1993), Anan et al. (2004)
DP	침투량 (mm)	1.0~8.8	Im et al. (2000), Song et al. (2013)
E_s	관개효율 (%)	46~93	Bos and Nugteren (1990), Kim et al. (2005)
NWR	묘대 용수량 (mm)	80~250	정하우 등 (2006)
TWR	이양 용수량 (mm)	80~250	정하우 등 (2006)

3.2. 대상저수지 및 자료구축

매개변수 민감도 분석 및 적용성 평가를 위한 대상지구는 실측 자료가 장기간 누적되었고, 자료의 품질이 우수한 곳이 적절하다. 본 연구의 대상지구로는 경기도 용인시와 평택시 일대에 위치한 이동저수지 지구를 선정하였으며, 해당 지구는 구획정리 및 용·배수로가 체계적으로 정비되어 있다. (그림 3-2-4a) (송정현 등, 2013a; 송정현 등, 2014b). 이동저수지는 4~9월에 취수탑을 통해 1,789.7 ha의 면적에 대해 농업용수를 공급하고 있으며, 홍수기에는 농업용수 공급의 지장이 없는 범위 내에서 radial gate를 통해 제한수위 방식과 예비방류방식을 모두 취하여 방류하고 있다 (송정현, 2013).

이동저수지에서는 한국농어촌공사 농어촌연구원이 간선수로 시점부에 초음파 수위계를 설치하여 수위를 연속 측정하고 있다 (그림 3-2-4b). 본 연구에서는 2001~2009년 기간의 연속 수위 자료를 확보하였으며, 수위에 대한 에러 검정을 수행하였다. 검정된 수위는 (그림 3-2-4c)와 같은 수위-유량 관계식을 이용하여 유량으로 환산 후 일별 농업용수 공급량으로 정리하였으며, 이를 이용하여 모의 결과를 평가하였다. 모형의 보정 기간은 2001~2007년, 그리고 검정 기간은 2008~2009년으로 구성하였다.



(그림 3-2-4) (a) 이동저수지 관개지구 위치, (b) 간선수로 시점부 전경, and (c) 수위-유량 관계 곡선

3.3. 농업용수 공급량 모의 모형의 적용성 평가

가. 적용성 평가기법

(1) 모형의 보정기법

모형의 보정기법은 시행착오법을 이용한 수동 보정과 최적화 기법을 이용한 자동 보정으로 구분되며, 과거에는 모형에 대한 풍부한 지식과 경험이 요구되는 시행착오법이 주로 이용되었으나, 최근에는 컴퓨터 속도의 발전과 함께 많은 노동력과 시간을 절감해 주고 사용자가 다르더라도 동일하고 객관적인 매개변수 추정이 가능한 자동 보정기법이 주로 이용되고 있다 (Moriassi et al., 2007; 김학관 등, 2009). 본 연구에서는 최적화 기법으로 유전자 알고리즘 (genetic algorithm)을 이용하여 모형의 보정을 수행하였고, 보정 후 최적화된 매개변수의 적절 여부를 수동으로 검토하였다 (송정현 등, 2015b). 유전자 알고리즘에 관한 이론 및 적용방법 등과 관련된 자세한 설명은 [제 3 장 제 4 절]과 송정현 등 (2014a)에 상세히 서술되어 있다. 최적화 기법의 목적함수로 는 오차 제곱의 합 (sum of squared residuals, *SSR*)을 선정하였고, 제약 조건은 <표 3-2-1>로 설정하여 매개변수가 물리적 범위를 벗어나지 않도록 구성하였다.

(2) 민감도 지수

매개변수 민감도 분석은 모형의 입력 매개변수의 변화에 따른 모의 결과의 변화 정도를 정량적으로 산정하는 과정으로, 주요 입력 매개변수를 파악함으로써 보정과정의 효율성을 높일 수 있고, 또한 모의 결과의 범위를 파악할 수 있다 (Moriassi et al., 2007). 본 연구에서는 농업용수 공급량 모의에 주요하게 영향을 미치는 매개변수를 파악하기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

민감도 분석을 수행하기 위해 상대 민감도 (relative sensitivity) (James and Burges, 1982)와 민감도 지수 (sensitivity index) (Cho and Mostaghimi, 2009, 송정현 등, 2015b)를 이용하였으며, 각각 식 (3-2-6)과 (3-2-7)과 같다.

$$S_r = \frac{\Delta O/O_b}{\Delta P/P_b} = \frac{(O - O_b)/O_b}{(P - P_b)/P_b} \quad (3-2-6)$$

$$SI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_r(i)| \quad (3-2-7)$$

여기서, S_r 은 상대 민감도로 입력 매개변수 값의 변화에 따른 모의 결과의 변화를 나타내는 인자이며, P_b 는 기준 매개변수 값 (base parameter value), P 는 입력 매개변수 값, ΔP 는 입력 매개변수 값과 기준 매개변수 값의 차, O_b 는 기준 매개변수 값에 의한 모의 결과, O 는 입력 매개변수 값에 의한 모의결과, ΔO 는 입력 및 기준 값에 따른 모의 결과의 차, SI 는 민감도 지수로 상대 민감도 절댓값의 평균이며, 그리고 N 은 입력 매개변수 값의 개수이다.

본 연구에서는 기준 매개변수 값으로 <표 3-2-1>에서 제시된 물리적 범위의 중간값을 선정하였다. 또한, 입력 매개변수 값으로는 기준 매개변수의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%를 선정하여 상대 민감도 및 민감도 지수를 산정하였다. Storm et al.

(1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)는 상대 민감도 및 민감도 지수를 평가하기 위하여, $SI < 0.01$ 의 경우 ‘insensitive’, $0.01 \leq SI < 0.1$ 의 경우 ‘slightly sensitive’, $0.1 \leq SI < 1.0$ 의 경우 ‘moderately sensitive’, $1.0 \leq SI < 2.0$ 의 경우 ‘sensitive’, 그리고 $SI \geq 2.0$ 의 경우 ‘extremely sensitive’와 같은 기준을 제시하였으며 본 연구에서도 이를 준용하였다.

(3) 보정 및 검정 평가기법

농업용수 공급량 모의 결과에 대한 평가를 위해서 통계적 지표를 이용한 정량적 기법과 산포도와 같은 그래프를 통한 정성적 기법을 동시에 이용하였다. 본 연구에서는 정량적 통계적 지표로 *NSE* (Nash-Sutcliffe Efficiency) (Nash and Sutcliffe, 1970), *RSR* (root mean square error (RMSE)-observations standard deviation ratio) (Moriasi et al., 2007), 그리고 *PBIAS* (percent bias) (Gupta et al., 1999)를 선정하였으며 각각의 식에 대한 자세한 설명은 [제 3 장 제 4 절]에 상세히 서술하였다.

정성적 방법으로는 실측치 및 모의치의 시간에 따른 변화 그래프와 산포도를 도시하여 평가하는 방법을 이용하였다. 산포도에서는 실측치와 모의치 사이의 추세선을 도시하여 기울기, y 절편, 그리고 R^2 또한 평가에 이용하였다.

나. 민감도 분석 결과

(그림 3-2-5)는 관개효율 (E_s), 침투량 (DP), 최소담수심 (PD_{min}), 물꼬 높이 (PD_{max}), 이양용수량 (TWR), 그리고 묘대용수량 (NWR) 기준 값의 -50%, -25%, -10%, +10%, +25%, +50%을 입력하였을 경우 모의 농업용수 공급량의 변화율을 나타낸 것이다. 여기서, (공급량 모의 값 변화율 ÷ 입력 값 변화율)은 상대 민감도 (S_r)를 의미한다. (그림 3-2-6)은 (그림 3-2-5)를 통해 계산된 상대 민감도를 평균하여 민감도 지수 (SI)를 산정한 결과를 보여주고 있다.

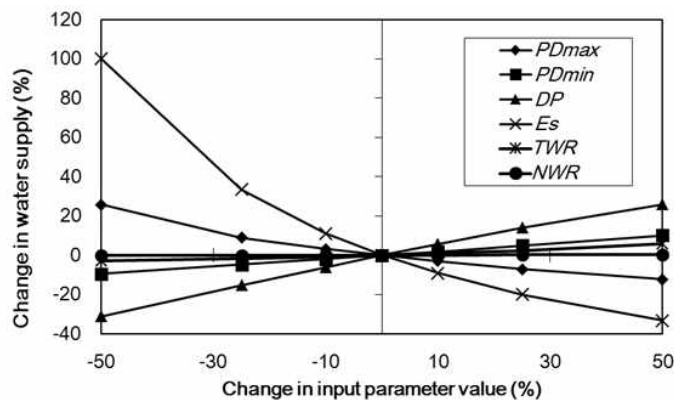
(그림 3-2-6)에서 민감도 지수가 양수이면 매개변수 값이 증가함에 따라 공급량 모의 결과 또한 증가함을 의미하고, 음수로 나타나면 매개변수가 증가함에 따라 공급량은 감소함을 의미한다. 즉, 농업용수 공급량은 관개효율과 물꼬 높이가 증가함에 따라 감소하였고, 침투량, 최소담수심, 이양용수량, 그리고 묘대용수량이 증가함에 따라 증가하였다. 이는 물꼬 높이의 경우, 값이 증가하면 배수량이 감소하고 유효수량이 증가하여 농업용수 공급을 절약할 수 있기 때문이다 (송정현 등, 2012). 최소담수심의 증가는 논벼의 생육 및 생산량 확보를 위해 최소한으로 유지해야 하는 담수심의 상승을 의미하며 (Anbumozhi et al., 1998), 동일한 강우에 대해 유효수량이 감소하여 농업용수 공급량은 늘어나게 된다. 일 침투량은 토양 특성과 관련된 매개변수로, 침투율이 증가하면 작물의 생육 스트레스를 피하기 위하여 필요수량 또한 증가하게 된다 (송정현 등, 2013a). 관개효율의 증가는 송수 중 손실되는 수량이 줄어들거나 농민의 물이용 효율이 증가하여 농업용수 공급량이 줄어도 같은 양의 필요수량이 포장으로 유입될 수 있음을 의미한다 (Howell, 2003).

(그림 3-2-6)으로부터 농업용수 공급량은 관개효율, 침투량, 물꼬 높이, 최소담수심, 이양용수량, 그리고 묘대용수량의 순으로 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. Storm et al. (1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)의 기준에 따르면 매개변수의 민감 정도는 관개효율의 경우 ‘sensitive’ ($1.0 \leq SI < 2.0$)로, 침투량과 물꼬 높이, 그리고 최소

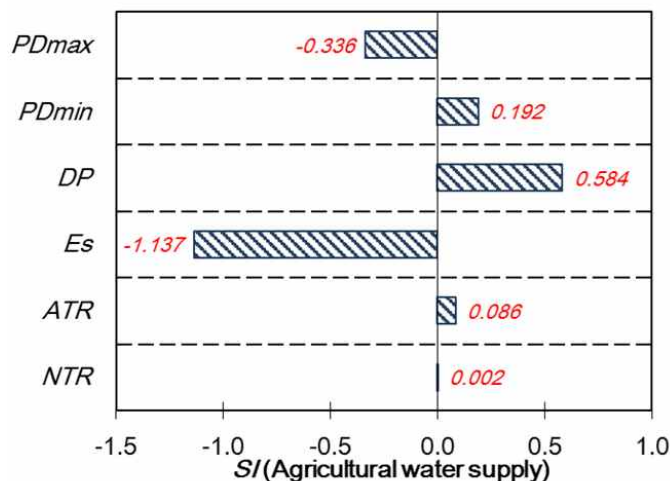
담수심의 경우 'moderately sensitive'로, 이양용수량의 경우 'slightly sensitive'로 ($0.1 \leq SI < 1.0$), 그리고 묘대 용수량은 'insensitive'로 분류되었다 ($SI < 0.01$).

본 연구 결과를 통해 관개효율의 민감도 지수는 -1.137로 농업용수 공급량 모의에 있어 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 모델링에서 가장 민감한 매개변수는 다른 매개변수보다 신중하게 이용 또는 보정될 필요가 있다. 관개효율은 기상, 관개조직의 특성, 저수지 관리자의 운영방식, 그리고 농민의 물이용 방식 등 물리적 요소 및 인위적 요소의 영향을 동시에 받는 매개변수로 연별로 값이 달라지는 특징을 가진다 (Kim et al., 2005; Howell, 2003). 일반적으로 가뭄인 해의 경우 농민이 물을 최대한 이용하려는 특성상 관개효율이 증가하는 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 2005). Wu and Chen (2012)에 따르면, 인위적 요소의 영향을 받아 시간에 따라 값이 변하는 특징을 가지는 매개변수의 경우 고정된 값을 이용하는 것보다 시간에 따라 값이 변하도록 보정하는 것을 추천하고 있다. 본 연구에서는 이를 반영하여 관개효율 매개변수를 연마다 값이 변하도록 보정하였다.

한편, 묘대 용수량 매개변수의 민감도 지수는 0.002로 가장 민감하지 않은 것으로 나타났다. 이는 최근의 조사에 따르면 묘대 용수량의 공급 면적이 전체 본답면적 대비 1/20에서 1/50으로 감소한 점이 모형에 반영하였기 때문으로 사료된다 (주옥중 등, 2006). 이와 같이 묘대 용수량은 전체 공급량에 비해 그 양이 상당히 적으므로 모형의 복잡성을 해소하고자 하는 경우 고려하지 않아도 무방할 것으로 사료된다.



(그림 3-2-5) 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수의 상대 민감도 분석 결과



(그림 3-2-6) 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수의 민감도 지수 분석 결과

다. 모형의 보정 및 검정

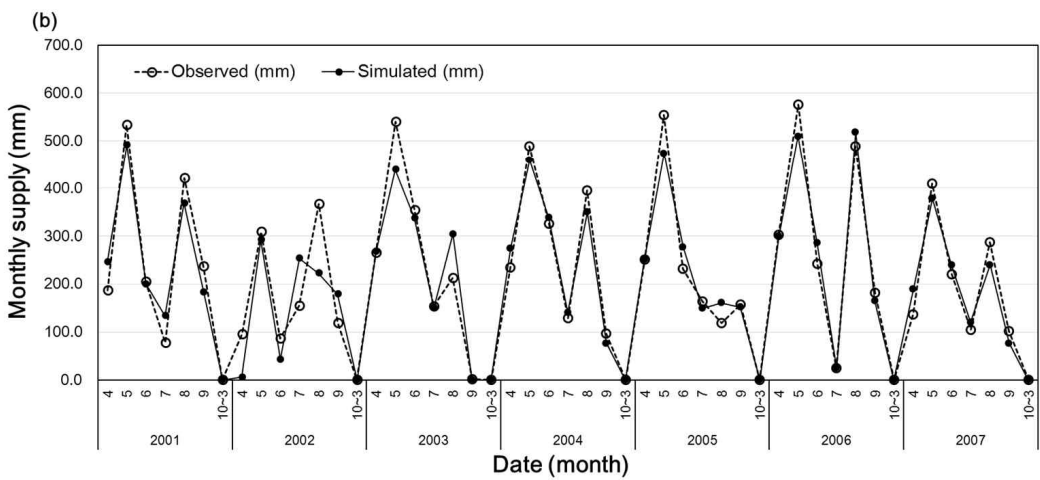
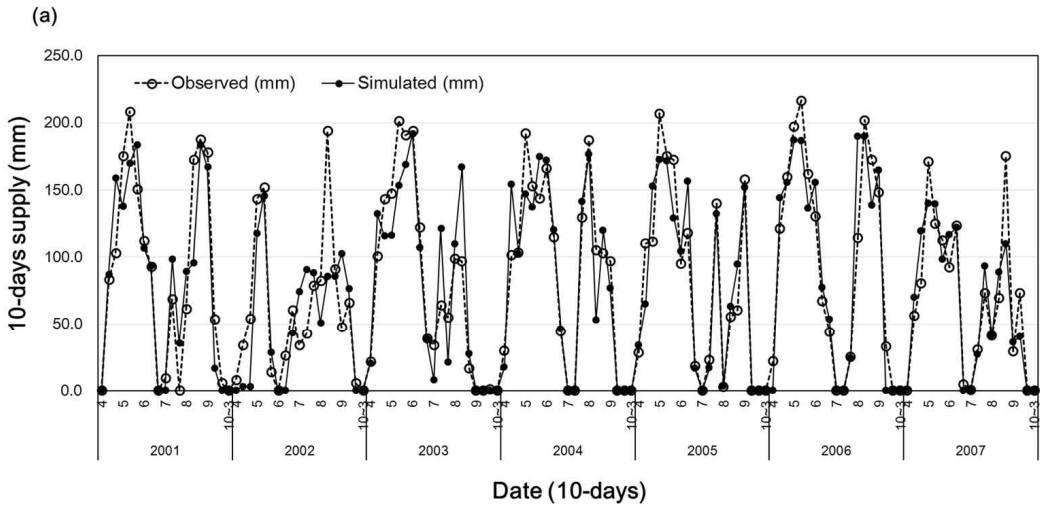
본 연구에서는 이동저수지를 대상으로 농업용수 공급량을 모의하였으며, 대상 저수지의 실제 공급량과 비교하여 모형의 보정 및 검정을 수행하였다. 모형의 보정은 2001~2007년 기간에 대해 수행하였으며, 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수인 *SSR*이 최소가 되는 시점에 자동으로 알고리즘이 종료되도록 구성하였다. 특히, 관개효율은 민감도 분석 결과에서 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. <표 3-2-2>는 모형의 보정 과정을 통해 선정된 최적 매개변수를 나타내고 있다. 모형의 검정은 2008~2009년의 자료 기간을 대상으로 보정 매개변수를 적용하여 수행하였다. 다만, 관개효율 매개변수는 2001~2007년 보정치의 평균값인 60.2%를 적용하였다.

(그림 3-2-7)~(그림 3-2-9)와 <표 3-2-3>은 모형의 보정·검정기간에 대한 정량적 및 정성적 평가 결과를 보여주고 있다. 농업용수 공급량은 수리시설물 운영의 인위성이 고려되어야 하는 모의 요소로, 이와 같은 경우 일별로 평가하는 것 보다 순별 또는 월별로 정리 후 평가하는 것이 일반적으로, 본 연구에서도 이를 준용하였다 (송정현, 2013; 송정현 등, 2013a). 모형의 보정기간에 대한 통계적 지표는 *PBIAS*의 경우 2.7%, *NSE*의 경우 순별 0.87 및 월별 0.93, 그리고 *RSR*의 경우 순별 0.37 및 월별 0.26의 값을 보였으며, Moriasi et al. (2007)에 따르면 ‘very good’으로 나타났다 <표 3-2-3>. 정성적으로도 농업용수 공급량의 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 보이고 (그림 3-2-7), 산포도 분석 결과 또한 추세선의 기울기가 0.90으로 상당히 높게 나타났으며 (Legates and McCabe, 1999), R^2 또한 순별 및 월별 각각 0.87과 0.93으로 0.50 이상의 높은 값을 보였다 (Moriasi et al., 2007) (그림 3-2-8). 특히 4~5월의 공급량이 크게 나타나는 특징과, 중간낙수기의 용수 공급이 중단되는 특징이 잘 반영된 것으로 사료된다.

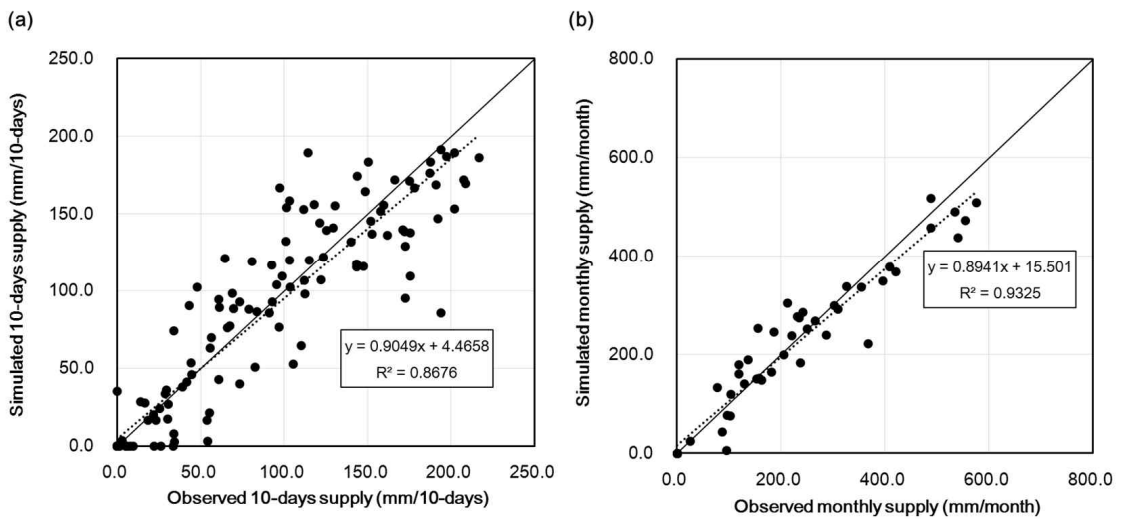
모형의 검정기간에 대한 통계적 지표는 *PBIAS*의 경우 3.9%, *NSE*의 경우 순별 0.74 및 월별 0.89, 그리고 *RSR*은 순별 0.51 및 월별 0.32로 보정기간에 비해 결과가 좋지 않았으나 Moriasi et al. (2007)의 기준으로부터는 ‘very good’으로 평가되었다 <표 3-2-3>. 정성적으로도 검정기간의 순별 모의 결과는 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났고, 실측치와 모의치의 추세선 기울기 및 R^2 또한 좋게 평가되었다 (그림 3-2-9). 이상의 결과와 같이 보정된 최적매개변수는 대상지구의 물리적 및 인위적 특성이 잘 반영된 것으로 사료된다. 그리고 비록 실측 공급량은 농민의 요구 및 관행적 요소를 고려하여 관개되는 요소이나, 필요수량과 관개효율을 이용하여 모의하여도 적절한 매개변수 값을 사용한다면 실측값의 경향을 잘 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

<표 3-2-2> 매개변수 보정 결과

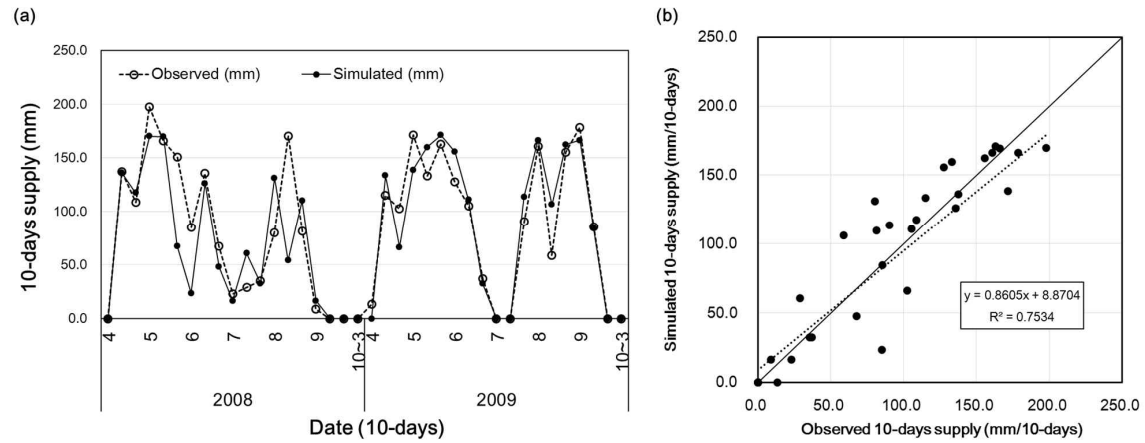
Parameters		Calibrated value
<i>PD_{max}</i> (mm)		50.0
<i>PD_{min}</i> (mm)		28.4
<i>DP</i> (mm)		5.4
<i>TWR</i> (mm)		250.0
<i>Es</i> (%)	2001	60.1
	2002	69.8
	2003	49.7
	2004	56.8
	2005	59.3
	2006	52.9
	2007	73.0



(그림 3-2-7) 보정기간 동안의 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교: (a) 순단위, (b) 월단위



(그림 3-2-8) : 보정기간 동안의 농업용수 공급량 산포도: (a) 순단위, (b) 월단위



(그림 3-2-9) 검정기간 동안의 월단위 농업용수 공급량 비교: (a) 시계열, (b) 산포도

<표 3-2-3> 보정 및 검정기간동안의 농업용수 공급량 실측치, 모의치, 그리고 통계적 변량

구분	연도	강수량 (mm)	실측 연공급량 (mm)	모의 연공급량 (mm)	PBIAS (%)	NSE		RSR	
						순별	월별	순별	월별
보정기간	2001	875.5	1,661.5	1,622.0	2.7	0.87	0.93	0.37	0.26
	2002	1,057.8	1,132.6	995.6					
	2003	1,333.6	1,526.8	1,498.1					
	2004	1,047.5	1,670.6	1,638.6					
	2005	1,260.4	1,476.4	1,463.3					
	2006	1,192.8	1,815.4	1,802.6					
	2007	1,078.6	1,258.5	1,242.2					
검정기간	2008	1,193.2	1,475.3	1,280.5	3.9	0.74	0.89	0.51	0.32
	2009	1,295.6	1,697.2	1,768.9					

* 기간은 4월~9월까지임

라. 최적매개변수와 문헌 제시 매개변수의 모의 결과 비교 및 고찰

앞서 선정된 최적매개변수는 본 연구 대상지의 실측 공급량 자료가 비교적 장기간 구축되어있기에 모형의 보정 및 검정을 거쳐 도출이 가능했다. 그러나 일반적인 경우는 해당 대상지의 실측 공급량 자료가 확보되지 않은 경우가 대부분이기 때문에 보정 및 검정 과정을 거칠 수가 없게 된다. 이러한 경우의 매개변수 선정은 보고서 및 선행연구 논문에서 제시되는 값을 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 (그림 3-2-6)의 결과와 같이 공급량 관련 매개변수는 모의 결과에 민감하게 영향을 미치기 때문에 적절한 매개변수 값의 선정이 중요하며, 문헌에서 제시된 매개변수를 이용한 결과가 실측치와 유사한지에 대한 평가할 필요가 있다.

<표 3-2-4>는 문헌을 통해 확보된 매개변수 값을 보여주고 있다. 물꼬 높이는 Yoo et al. (2008)에서 사용한 수치인 80.0 mm을 이용하였고, 최소담수심은 허유만 등 (1993)에서 제시하는 0~60 mm의 중간값인 30.0 mm을 이용하였다. 침투량은 농어촌연구원 (2012)에서 이동저수지 지구에 대해 보고한 4.6 mm/day를 이용하였으며, 이양 및 묘대용수량은 농림부 (1997)에서 보고한 우리나라 평균 값인 140.0 mm를 이용하였다. 관개효율은 농업기반공사 (2005)에서 대상 지구에 대한 값으로 55%를 제시하고 있어 이를 이용할 수 있으나, 만약 해당 관개지구에 대한 정보가 없는 경우 농업생산기반정비사업설계기준 관개편 (MAF, 1998)에서 제시하는 75%를 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 관개효율 매개변수를 75% 및 55%를 사용하는 경우에 대해 각각 Type A와 Type B로 구분하였고, 나머지 매개변수는 <표 3-2-4>에 제시된 값을 이용하여 공급량을 모의하였으며, 이를 실측치와 비교하였다.

(그림 3-2-10)은 Type A와 Type B 매개변수를 이용하여 모의한 결과를 최적 매개변수 모의 결과 및 실측치와 비교하여 보여주고 있다. <표 3-2-5>는 통계적 지표 산정 결과를 나타내고 있다. Type A 매개변수를 이용하여 모의된 결과는 상당히 과소 모의된 것으로 나타났으며 (그림 3-2-10), 통계적 지표인 *PBIAS*, *NSE*, 그리고 *RSR*의 월별 값은 43.1%, 0.03, 그리고 0.98로 나타나 “unsatisfactory”로 평가되었으며 (Moriasi et al., 2007), 그 경계 값인 25%, 0.50, 그리고 0.70으로부터도 상당히 떨어져 있음이 확인되었다 <표 3-2-5>. 이는 최적 매개변수의 평균 관개효율은 60.3%이었는데 비해 Type A에서는 75%가 적용되었기 때문으로 사료된다. 또한, 최적 매개변수 모의 결과에서는 관개효율이 연별로 달리 적용된데 비해 Type A에서는 일정한 값이 적용 점도 크게 영향을 미쳤을 것이다. Type B의 경우 Type A에 비해 통계적 지표가 더 좋은 결과로 나타났고, 순별 단위에 대해서 “satisfactory”로 평가되었다 (Moriasi et al., 2007). 하지만 최적 모의 결과가 “very good”으로 평가된 점과 비교하면 Type B의 결과 또한 상당히 안 좋은 것으로 사료되며, 이는 관개효율 매개변수뿐만 아니라 다른 매개변수도 최적매개변수 값과 차이가 나기 때문으로 사료된다. 이상의 결과와 같이 농업용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수 값의 이용은 중요하며, 보정 과정 없이 문헌에 제시된 매개변수 값을 이용하여 모의하는 경우 결과가 매우 나쁠 가능성이 있음이 확인되었다.

<표 3-2-4> 문헌 제시 매개변수

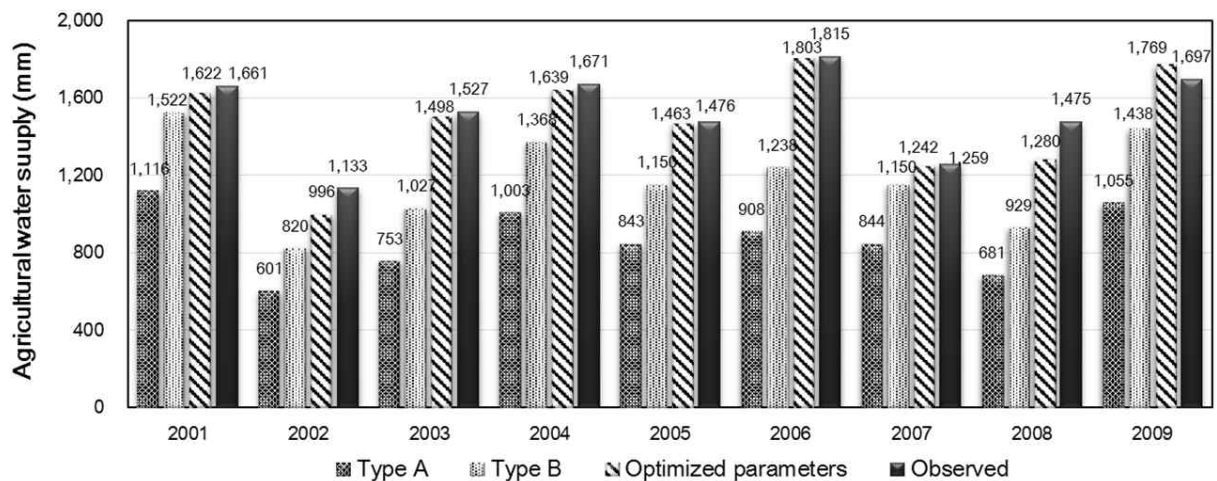
매개변수	값	참고문헌
PD_{max} (mm)	80.0	Yoo et al. (2008)
PD_{min} (mm)	30.0	허유만 등 (1993)
DP (mm/day)	4.6	농어촌연구원 (2012)
TWR (mm)	140.0	농림부 (1997)
NWR (mm)	140.0	농림부 (1997)
Es (%)	75	농림부 (1998)
	55	농업기반공사 (2005)

<표 3-2-5> Type A와 Type B의 통계적 변량 산정 결과 비교

Run type	$PBIAS$ (%)	R^2		NSE		RSR	
		순별	월별	순별	월별	순별	월별
Type A	43.1	0.62	0.65	0.29	0.03	0.84	0.98
Type B	22.4	0.62	0.65	0.52	0.49	0.69	0.71

* Type A: PD_{max} 80.0 mm, PD_{min} 30.0 mm, DP 4.6 mm/day, TWR 140.0 mm, NWR 140.0 mm, and Es 75%

Type B: PD_{max} 80.0 mm, PD_{min} 30.0 mm, DP 4.6 mm/day, TWR 140.0 mm, NWR 140.0 mm, and Es 55%,



(그림 3-2-10) 이동저수지의 연공급량 실측 결과, Type A 결과, Type B 결과, 그리고 최적 매개변수 적용결과의 비교

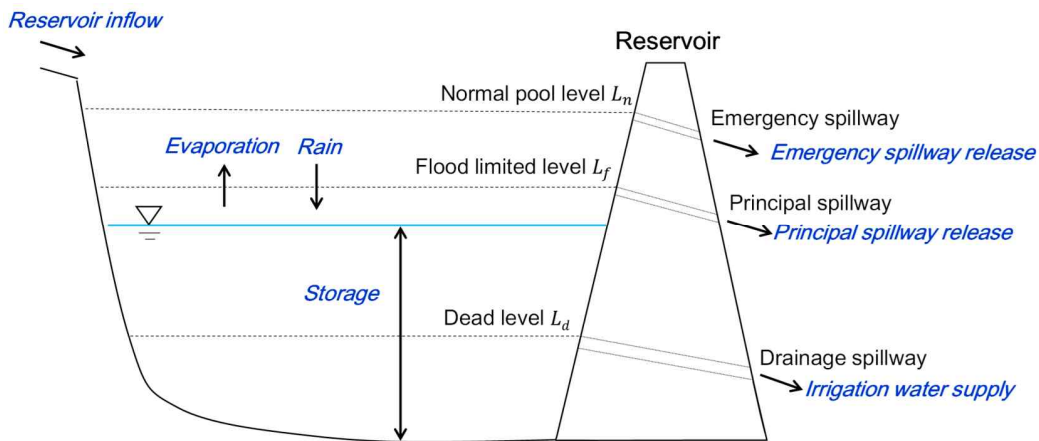
4. 농업용 저수지 물수지 해석 모형의 개발 및 적용

4.1. 물수지 해석 모형의 개발

본 연구에서는 관개효율의 연단위 변화 및 홍수기 제한수위를 고려한 농업용 저수지 일별 물수지 모형을 개발하였다. 저수지 물수지는 (그림 3-2-11)과 같으며, 다음 식 (3-2-8)과 같은 저수지 연속방정식으로 표현할 수 있다.

$$S_i = S_{i-1} + Q_i + RAIN_i - ROL_i - E_i - PS_i - ES_i \quad (3-2-8)$$

여기서, S 는 저수량 (m^3), Q 는 저수지 유입량 (m^3), $RAIN$ 는 저수지 수면 강수량 (m^3) ROL 은 농업용수 공급량 (m^3), E 는 저수지 수면 증발량 (m^3) PS 는 제한수위 방류량 (m^3), ES 는 만수위 방류량 (m^3) i 는 시간간격 (day)이다. 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량은 각각 사수위 (dead level), 제한수위 (flood-limited level), 만수위 (normal pool level)에 의해 영향을 받는다.



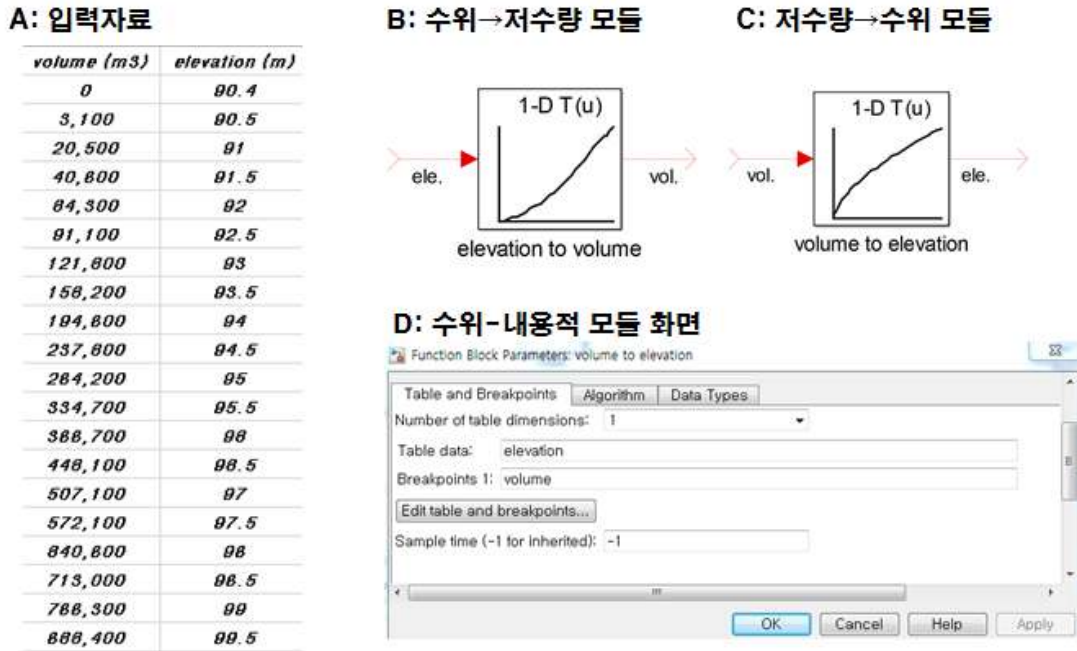
(그림 3-2-11) 저수지 물수지 구성요소 및 관리수위

저수지 물수지 구성요소 중 유입 성분은 저수지 유입량 (저수지 상류유역 유출량)과 강수량이다. 유출성분은 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 그리고 증발량이다. 유출성분 중 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량은 단순히 물수지식에 의해 지배되는 것이 아니라 저수지 운영자 등의 인간에 의한 영향도 고려되어야 한다. 농업용수 공급량은 관개시기에 취수구를 통해 공급이 되며, 비관개기에는 관개되지 않는다. 또한, 농업용수 공급량은 해당 날짜가 관개기에 포함되더라도 저수지의 수위가 사수위 이하인 경우 공급을 중단해야 한다. 한편, 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 수위조절장치(수문)가 있는 저수지에 대하여 용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 제한수위를 설정하여 운영하도록 규정되어 있다. 이에 따라 제한수위를 넘는 수량에 대해 방류가 되도록 모의해야 한다. 따라서 저수지 물수지 모의를 위해서는 단순히 저수지 물수지식을 적용해서는 안 되며, 저수지 운영규칙이 고려되어야 한다. 이상을 고려한 저수지 물수지 구성 성분의 모의 방식은 다음과 같다.

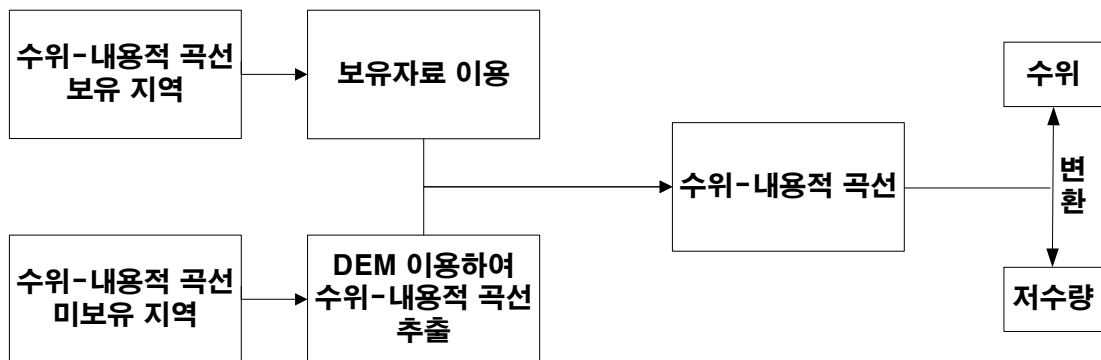
가. 저수지 내용적

저수지의 수위 변화에 따른 저수량을 산정하기 위해서는 저수지의 표고별 내용적 자료가 필요하다. 수지 수위-내용적 곡선은 해당저수지의 관리기관에서 측량된 자료를 보유한 경우는 보유 자료를 사용하도록 구성하였고, (그림 3-2-12)와 같이 스프레드시트 기반으로 입력 후 저수지 물수지 모형과 연동이 되도록 구성하였다. 수위-내용적 곡선이 없는 미계측

지역의 경우는 수치표고모델 (DEM)을 이용하여 표고별 수면적 자료를 생성하여 내용적을 추정하여 이용하도록 구성하였다 (그림 3-2-13).



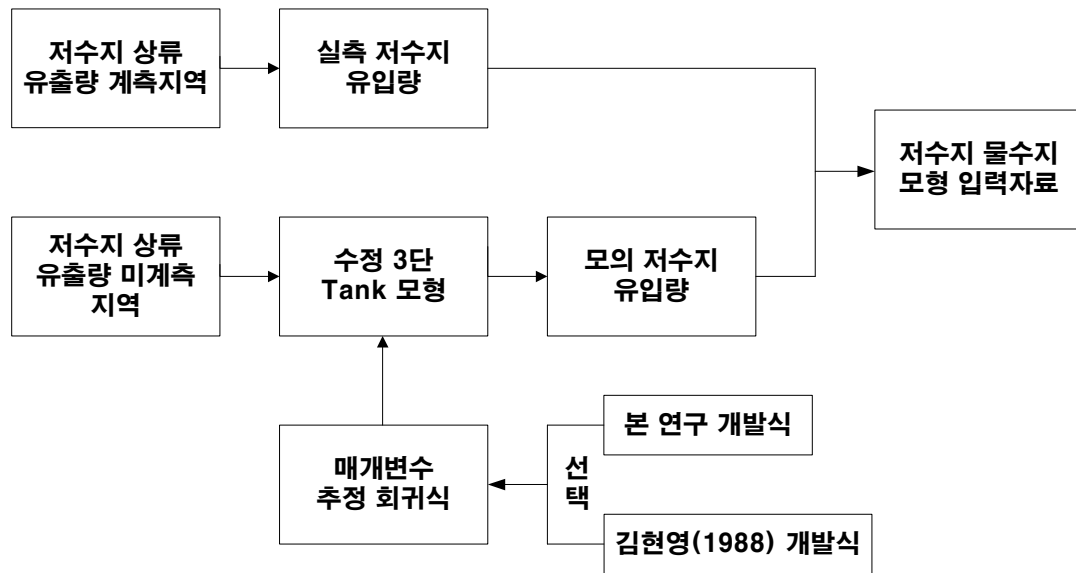
(그림 3-2-12) 저수지 내용적 모듈 구성요소



(그림 3-2-13) 수위-내용적 곡선 보유유무에 따른 수위-저수량 변환방식

나. 저수지 유입량

저수지 유입량 (I_t)는 수정 3단 Tank 모형을 이용하여 모의하도록 구성하였다. 해당저수지의 상류유역이 미계측 지역인 경우 매개변수 추정 회귀식을 이용한다. 매개변수 추정 회귀식은 (그림 3-2-14)와 같이 본 연구 개발 회귀식과 김현영 (1988)의 회귀식 중 선택하여 이용하도록 구성되어 있다. 수정 3단 Tank 모형과 매개변수 추정 회귀식에 관한 자세한 내용은 [제 3 장 제 1 절]에 기술되어 있다.



(그림 3-2-14) 저수지 상류유출량 실측자료 보유유무에 따른 저수지 유입량 입력자료

다. 농업용수 공급량

농업용수 공급량 (ROL)은 영농기에 논으로 공급되는 관개량 (IR)과 수로손실 및 배분관리용수량 (또는 용수로 배수량)을 고려한 관개효율 (E_p)로부터 산정된다. 농업용수 공급량 모의 기법에 관한 자세한 설명은 앞선 [제 3 장 제 2 절 3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용]에 상세히 서술되어 있다. 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수의 변화는 기타 저수지 물수지 요소에도 크게 영향을 미친다. 이에 관한 상세한 서술은 민감도 분석 부분에 서술하였다.

라. 환경용수 공급량

환경용수 (하천유지용수)는 농촌지역의 생활용수, 공업용수, 농업용수, 수산용수 등과 함께 농촌용수의 범주에 포함되며, 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 최소한의 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 환경용수를 동시에 만족시키는 용수를 뜻한다 (김상민 등, 2011).

본래 농업용저수지는 농업용수 공급에 목적을 두고 건설되어 환경용수 공급은 고려 대상이 아니었다. 하지만 최근 실시된 농업용 저수지 뚝 높이기 사업의 목적에 환경용수 공급이 포함되었으며, 향후 농업용 저수지에서의 환경용수 공급이 확대될 것으로 사료되어 본 연구에 환경용수 공급량을 포함하였다.

농업용 저수지의 환경용수 공급에 관해서는 다양한 연구가 진행되었다. 노재경 등(2011)은 뚝 높이기 저수지 중 유역배율이 다른 8개소를 대상으로 이수관리곡선을 작성하고, 정상운영 및 제한운영에 의한 용수공급량 변화를 분석하였으며, 김상민 등 (2011)은 농업용 저수지의 환경용수 공급 방안을 제시하기 위해 저수지 물수지와 환경용수 방류 시나리오 작성 기준을 만들고 경상남도 고성군에 위치한 하이저수지에 적용하였다.

유승환 등 (2012)은 비관개기 시점 (10월 1일)의 초기저수지량을 3단계로 구분하고 관개

기 시점 (4월 1일)의 목표저수량을 설정하여 방류기준곡선과 구간별 환경용수 방류기준량을 산출하고 이를 바탕으로 방류기준을 설정하였으며, 이를 독 높이기 저수지 중 운암, 장치 및 탐정 저수지에 적용하였다. 이상현 등 (2013)은 유승환 등 (2012)이 작성한 환경용수 방류기준을 독 높이기 저수지 중 낙동강 수계 내성천 상류 지역의 단산, 삼가, 금봉 및 창평 저수지에 적용하여 독 높이기 이전의 무효방류량과 비교하였으며, 비관개기 기간 동안의 환경용수 방류패턴을 분석하였다.

농업용 저수지의 환경용수 방류기준에 대한 많은 연구가 이루어지고 있지만 명확한 방류기준이 정해지지 않고 있다. 또한 농업용 저수지의 가장 큰 역할인 농업용수 공급에 차질이 없기 위해서는 현장 상황에 따라 환경용수 방류량이 달라져야 할 것이다. HOMWRS 모형에서는 일별 환경용수 방류량을 입력해 연중 일정한 방류를 하도록 설정되어 있으나 이는 현실을 잘 반영하지 못하고 있다. 하지만 현 시점에서 환경용수 방류와 관련된 명확한 기준이 아직 설정되어 있지 않아, 본 모형에서는 HOMWRS와 같이 일별 환경용수 방류량의 입력이 가능하도록 환경용수 방류 기작을 구성하였고, 추후 방류기준이 정립되면 이에 대한 추가가 필요할 것이다.

마. 제한수위 및 만수위 방류량

우리나라 농업용 저수지는 일반적으로 물넘이가 자연 월류식으로 만수위 이상의 저수량을 전량 월류하고 있다. 저수위가 만수위 이상인 경우 월류되는 수량을 만수위 방류량이라고 하며, 이는 식 (3-2-9)로부터 계산된다.

$$ES_i = S_i - S_n \quad (\text{단, } L_i > L_n) \quad (3-2-9)$$

여기서, ES 는 만수위 방류량 (m^3), S_i 는 당일의 저수량 (m^3), S_n 는 만수위의 저수량 (m^3), L_i 는 당일의 저수위 (m), L_n 는 만수위 (m)이다.

한편, 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 홍수기 피해를 줄이기 위하여 제한수위를 설정하여 관개에 지장을 주지 않는 범위에서 유지하도록 규정되어 있다. 따라서 자연 월류식 물넘이 이외의 물넘이가 설치된 지역에서는 제한수위를 운영하여 제한수위 이상의 저수량을 홍수기에 방류하고 있다. 하지만 DIROM, HOMWRS 등의 기존의 저수지 물수지 모형은 개발 당시 홍수기 제한수위를 운영하지 않아 제한수위 운영에 따른 강제 방류량을 모의하지 못 하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 제한수위 운영기를 설정하여 제한수위를 초과하는 수량을 강제 방류하는 모듈을 개발하였으며 식으로 나타내면 식 (3-2-10)과 같다.

$$PS_i = S_i - S_f \quad (\text{단, } L_i > L_f \text{ and } PS_{\max} > PS_i) \quad (3-2-10a)$$

$$PS_i = PS_{\max} \quad (\text{단, } L_i > L_f \text{ and } PS_{\max} < PS_i) \quad (3-2-10b)$$

여기서, PS 는 제한수위 방류량 (m^3), PS_{max} 는 일 최대 제한수위 방류량 (m^3), S_i 는 당일의 저수량 (m^3), S_f 는 제한수위의 저수량 (m^3), L_i 는 당일의 저수위 (m), L_f 는 제한수위 (m)이다. 제한수위 방류량은 자연 월류식 물넘이가 아닌 수문 등을 통해서 방류되기 때문에 수문의 제원에 따른 일 최대 제한수위 방류량 이상을 방류할 수 없다. 또한, 제한수위 초과 수량은 제한수위 운영기에 방류하며 비운영기에는 방류하지 않는다.

바. 수면강우량 및 수면증발량

수면강우량 및 수면증발량은 식 (3-2-11)과 식 (3-2-12)와 같이 기상관측소의 강우량 및 증발량 실측치에 저수지 면적을 곱하여 산정한다. 기상관측소의 증발량 실측치가 없는 경우 일사량, 풍속, 상대습도, 기온 등의 자료를 이용하여 Penman식을 이용하여 증발량을 산정하도록 구성하였다.

$$RAIN_i = rain \times A_i \quad (3-2-11)$$

$$E_i = evap \times A_i \quad (3-2-12)$$

여기서, $RAIN$ 은 저수지 수면 강우량 (m^3), E 는 저수지 수면 증발량 (m^3), A 는 당일의 저수면적, $rain$ 은 당일의 기상청 강우량 (mm), $evap$ 는 당일의 기상청 증발량 (mm)이다.

사. 저수지 운영규칙

저수지 물수지를 모의하기 위해서는 저수지 운영규칙도 적용되어야 한다. 우리나라 농업용 저수지는 논벼의 관개를 위한 단일 목적으로 건설되었으나, 최근에는 홍수기의 수위조절 등의 규칙이 추가됨에 따라 다목적으로 운영되고 있다. 또한, 앞선 [제 3 장 제 2 절 3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용]에서 도출되었던 결과와 같이 관개효율의 경우 연별로 보정하지 않으면 농업용수 공급량 및 기타 저수지 물수지 요소가 실제 결과가 크게 상이할 수 있기 때문에 이에 대한 고려도 필요하다. 본 연구에서는 운영시기는 관개기, 중간낙수기, 제한수위 운영기로 구분하였으며, 4가지 규칙 (Scheme)을 개발하였다. Scheme I은 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 모두 고려하는 경우이다. Scheme II는 자연 월류식 물넘이 이외의 별도의 수문이 없어 제한수위를 운영하지 못 하는 지역을 고려하여, Scheme I에서 제한수위를 운영을 고려하지 않는 경우이다. Scheme III은 Scheme I에서 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않는 경우이다. Scheme IV은 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화 모두 고려하지 않는 경우이다.

(1) 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 고려한 저수지 운영규칙 (Scheme I)

- ① 관개기에는 본 연구의 농업용수 공급량 산정방식에 따라 관개한다.
- ② 중간낙수기에는 농업용수 공급을 강제 중단한다.
- ③ 저수지 수위가 사수위 이하로 내려가면 농업용수 공급을 중단한다.

- ④ 만수위 이상의 수위는 방류한다.
- ⑤ 제한수위 관리기에 제한수위 이상의 저수량은 강제 방류한다.
- ⑥ 관개효율 매개변수는 저수지 수위과 비교하여 연단위로 보정한다.

(2) 제한수위 운영을 고려하지 않는 저수지 운영규칙 (Scheme II)

- ① 제한수위 운영을 고려하지 않아 제한수위 관리기에도 제한수위 이상의 저수량에 대해 강제 방류하지 않는다. 별도의 수문이 없어 제한수위를 운영하지 못 하는 지역에 대해 적용한다.
- ② 기타 운영규칙은 Scheme I과 동일하다.

(3) 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않는 저수지 운영규칙 (Scheme III)

- ① 관개효율 매개변수를 시간에 따라 변하지 않도록 고정한다. 실측 저수지 수위가 없어 보정이 어려운 경우에 대해 이를 적용한다.
- ② 기타 운영규칙은 Scheme I과 동일하다.

(4) 제한수위 운영 및 관개효율 변화를 고려하지 않는 저수지 운영규칙 (Scheme IV)

- ① 제한수위 운영과 관개효율 변화를 모두 고려하지 않는다. 별도의 수문이 없으며, 실측 저수지 수위 자료가 없는 지역에 대해 이를 적용한다.
- ② 기타 운영규칙은 Scheme I과 동일하다.

4.2. 대상저수지 및 자료구축

가. 대상저수지 선정

본 연구에서는 저수지 물수지 해석 모형의 적용성 검토를 위하여 농촌용수구역을 대상으로 농업용 저수지의 수위 관측 자료를 수집하였으며, 수위 관측 자료의 신뢰성이 높은 지구를 대상지구로 선정하였다. 대상 지구는 고풍, 탐정, 고삼, 청천저수지로 선정하였으며 한국농어촌공사 관할 저수지로 수위를 실시간으로 측정하고 있다. (그림 3-2-15)는 대상지구의 위치를 보여주고 있다.

고풍저수지 (N 36°47', E 126°36')는 1974년에 준공된 저수지로서 충청남도 서산시 운산면 고풍리에 위치하며 수계상으로는 지방2급 역천의 상류에 위치하고 있다. 탐정저수지 (N 36°10', E 127°10')는 1944년에 준공된 저수지로 1971년 말부터 1974년 초까지 제당 1.5 m, 물넘이는 1.8 m 승상한 바 있으며, 논산천 상류지점인 충청남도 논산시 가야곡면 종연리에 위치한다. 고삼저수지 (N 37°05', E 127°17')는 1963년에 준공된 저수지로서 경기도 용인시 원삼면 한천 상류에 위치하고 있으며, 행정구역상 안성시 고삼면 월향리에 속한다. 청천저수지 (N 36°24', E 126°38')는 1960년에 준공된 저수지로서 행정구역상 충청남도 보령시 죽정동, 청라면 장산리 일원에 위치한다.

나. 지형자료 및 저수지 제원

저수지 물수지 해석기법의 적용을 위한 입력자료 구축을 위해 대상 저수지의 상류유역 면적 및 토지이용, 유역경사, 유로연장, 관개면적, 만수위, 사수위, 홍수기 제한수위 등의 자료를 한국농어촌공사 제공 보고서 및 GIS를 통해 조사하였으며, 정리하면 <표 3-2-6>과 같다.

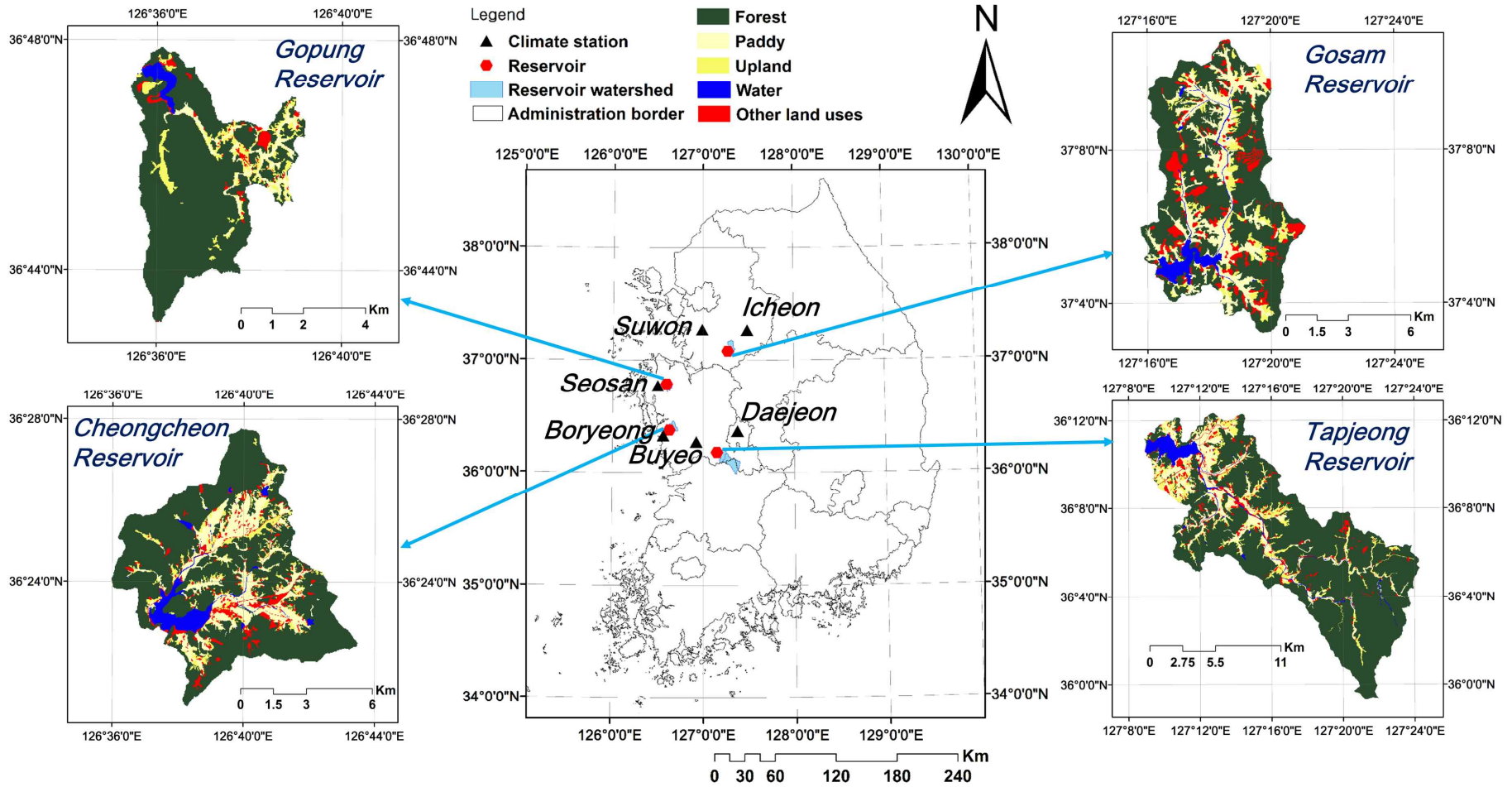
고풍저수지 상류유역은 면적 2,590 ha, 유역경사는 1.8 %, 유로연장은 9.2 km이고, 산림이 86.8 %를 차지하고 있다. 고풍저수지는 총저수량은 8,383 천 m^3 으로서 농업용저수지로는 규모가 큰 편이고, 댐형식은 중심 Core형 필댐으로 높이는 33.2 m이고 댐 길이는 227 m이다. 방류시설인 물넘이는 Siphon구조(2.5×7 m^2)로 되어있어 다른 일반적인 농업용저수지 물넘이와는 다른 방류특성을 가지며 관리수위는 사수위 EL.62.0 m, 만수위는 EL.85.0 m, 제한수위 EL.83.7 m로 관리되고 있다. 용수공급을 위한 저수위는 3월말 현재 만수위인 표고 +85.00 m가 되도록 확보하며, 홍수기 하류지역의 홍수피해를 줄이기 위하여 제한수위는 표고 +83.70 m(만수위 저수용량의 90 %)를 유지하도록 규정하고 있다.

탐정저수지 상류유역은 면적 21,880 ha, 유역경사는 12.9 %, 유로연장은 36.9 km이고, 유역의 대부분인 74 %가 임야로 구성되어 있다. 고풍저수지는 총저수량은 31,927 천 m^3 으로서 총 5,137 ha의 농경지에 농업용수를 공급하고 있고, 댐형식은 중심 Core형 필댐으로 높이는 17.8 m이고 댐 길이는 511 m이다. 방류시설인 물넘이는 자연월류식 비상여수토(113 m)와 수문식 여수토(8.0×4.3×10 m^3)의 이중구조로 되어있으며 관리수위는 사수위 EL.16.0 m, 만수위 EL.28.3 m, 제한수위 EL.27.3 m로 관리되고 있다.

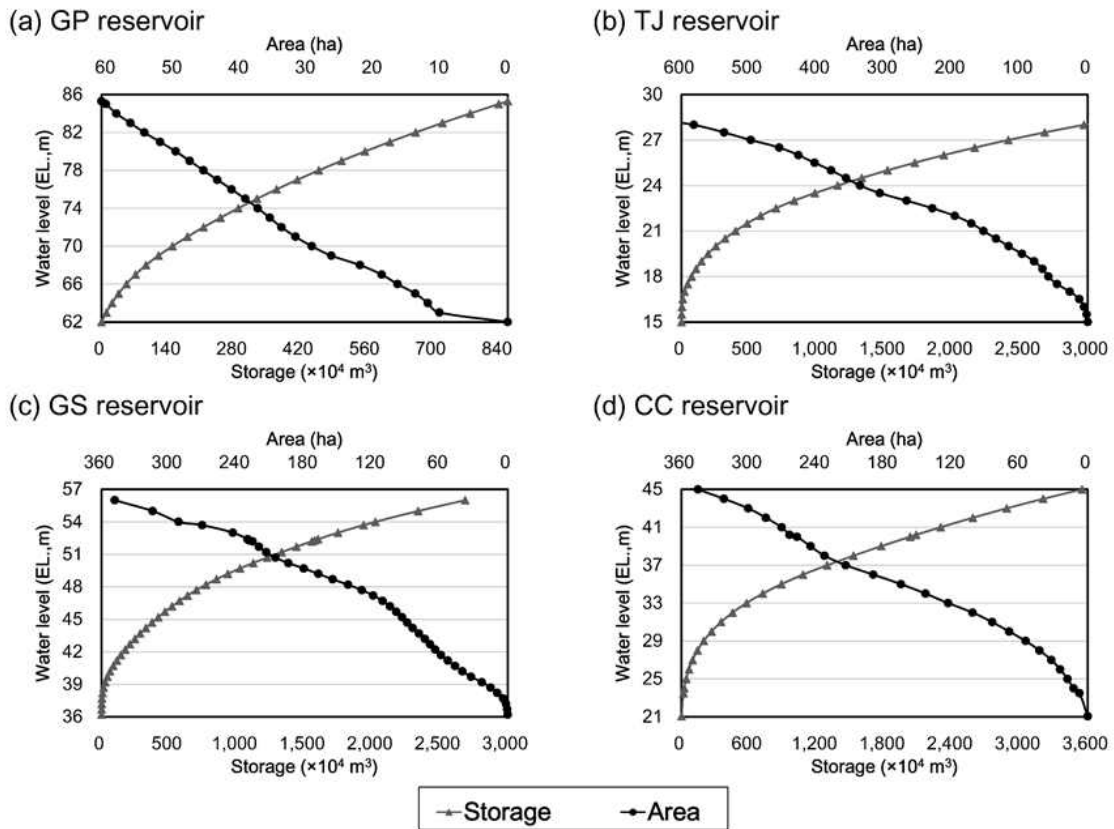
고삼저수지 상류유역은 면적 7,100 ha, 유역경사는 6.0 %, 유로연장은 12.6 km이고, 산림이 53.6 %를 차지하고 있다. 댐형식은 중심 Core형 필댐으로 높이는 16.6 m이고 댐 길이는 207 m이다. 방류시설인 물넘이는 측구식(146 m)과 게이트식(4.0×3.0×5 m^3)의 복합구조로 되어있으며 관리수위는 사수위 EL.42.5 m, 만수위 EL.54.1 m, 제한수위 EL.51.9 m로 관리되고 있다.

청천저수지 상류유역은 면적 7,010 ha, 유역경사는 2.4 %, 유로연장은 10.5 km이고, 산림이 67.9 %를 차지하고 있다. 댐형식은 존형 필댐으로 높이는 23.0 m이고 댐 길이는 306 m이다. 방류시설인 물넘이는 텐타게이트 형식(7.5×5.0×4 m^3)으로 되어있으며 관리수위는 사수위 EL.23.2 m, 만수위 EL.40.2 m, 제한수위는 2011년 EL.38.7 m에서 2012년 EL.39.6 m로 관리되고 있다. 저수지 수위는 비관개기에는 저수지로 유입되는 수량을 최대한으로 저류하여 용수공급에 지장이 없도록 EL.40.2 m가 되도록 확보하며, 홍수기 제한수위는 EL.38.7 m(만수대비 80 %)를 유지하도록 규정하고 있다.

한편, 저수지 물수지 해석을 위해서는 저수지의 표고에 따른 내용적 자료가 필요하다. (그림 3-2-16)은 고풍, 탐정, 고삼, 청천의 표고별 면적 및 내용적 곡선을 보여주고 있다.



(그림 3-2-15) 대상저수지의 위치 및 상류유역의 토지이용



(그림 3-2-16) 대상저수지의 표고별 면적 및 내용적 곡선 (한국농어촌공사, 2010)

<표 3-2-6> 대상지구 지형특성 및 저수지 제원

특성		고풍저수지	탑정저수지	고삼저수지	청천저수지
상류 유역	면적 (ha)	2,590	21,880	7,100	7,010
	논 비율 (%)	5.4	10.4	12.8	15.8
	밭 비율 (%)	2.6	7.9	5.4	6.5
	산림비율(%)	86.8	73.6	53.6	67.9
	유역경사 (%)	1.8	12.9	6.0	2.4
	유로연장 (km)	9.2	36.9	12.6	10.5
저수지 제원	관계면적 (ha)	1,294	5,137	2,949.9	2,638
	총 저수량 (만 m^3)	838.8	3,161	1,522	2,072.8
	만수위(m)	85.0	28.3	54.1	40.2
	사수위(m)	62.0	16.0	42.5	23.2
	홍수기 제한수위 (m)	83.7	27.3	51.9	2011: 38.7 2012: 39.6
	물넘이 형식	사이편식	월류식, 수문식	측구식, 수문식	텐타게이트

다. 기상자료

기상 입력자료는 기 구축된 기상 데이터베이스를 이용하였다. 고풍저수지 유역은 설계당시 수원관측소를 적용하여 설계를 하였으나 Thiessen Network상 서산관측소의 지배구역에 전 유역이 포함된다. 탑정저수지 유역은 대전, 금산 및 부여관측소에 걸쳐있으며, 이 중 금

산관측소가 86.8 %로 가장 크다. 고삼저수지 유역은 이천관측소에 포함되며 수원, 천안관측소와 인접하고 있으나 지형학적으로 수원관측소의 영향을 많이 받는 유역이다. 청천저수지는 보령관측소가 인근에 위치하고 있다. 고풍, 탐정, 고삼, 그리고 청천 저수지에 대한 기상자료 중 강우량, 기온, 습도, 풍속, 그리고 일사량 자료는 각각 서산, 부여, 이천, 그리고 보령 기상청의 자료를 이용하였다. 하지만 부여, 이천, 그리고 보령 기상청에서는 증발량 자료를 측정하고 있지 않기 때문에 탐정, 고삼, 그리고 고풍과 청천 저수지는 각각 대전, 수원, 그리고 서산 기상청의 증발량 자료를 이용하였다. <표 3-2-7>은 대상저수지의 연강우량을 나타내고 있고, <표 3-2-8>은 월평균 기온 및 강우량을 보여주고 있다.

<표 3-2-7> 대상저수지의 연강수량

연도	강우량 (mm)			
	고풍	탐정	고삼	청천
2011	1,704.4	1,823.9	2,045.0	1,743.0
2012	1,642.6	1,443.2	1,559.2	1,318.9
2013	1,335.0	1,024.7	1,366.9	1,389.3
2014	1,000.2	1,131.4	791.5	1,010.1
평균	1,420.6	1,355.8	1,440.7	1,365.3

<표 3-2-8> 대상저수지의 월평균 기온 및 강우량

월	평균기온 (°C)				강우량 (mm)			
	고풍	탐정	고삼	청천	고풍	탐정	고삼	청천
Jan	-2.8	-3.1	-4.9	-1.7	15.5	16.8	14.7	16.8
Feb	-0.2	0.5	-0.9	0.8	32.8	28.4	35.5	27
Mar	4.4	5.3	4.9	4.9	41.1	64.5	37.6	43.2
Apr	10.1	11.3	11.2	10.4	97.8	94.5	108.7	69.8
May	16.9	17.8	17.8	16.4	86.5	67.5	80.2	73.4
Jun	21.7	22.7	22.6	21.5	171.5	134	151.5	170.1
Jul	24.6	25.6	25	25	355.3	288.7	495.5	331.4
Aug	25.2	25.5	25.2	25.7	292.1	370.1	239.6	280.7
Sep	20.3	20.4	19.7	21	152.6	122.3	148.2	187.6
Oct	14	13.6	12.7	14.7	61.5	69.1	55.1	61.5
Nov	7.9	7.5	6.1	9	65.2	67.5	49.8	61.6
Dec	-0.7	-1.1	-3.3	0.4	48.7	32.3	24.6	42.3
평균	11.8	12.2	11.4	12.4	118.4	113	120.1	113.8

라. 영농현황

대상지구의 영농현황은 필요수량 산정을 위한 이앙기, 본답기, 중간낙수기 등의 입력자료로 이용되며 한국농어촌공사에서 전국에 대해 조사한 자료 중 인근지역을 선정하여 초기값으로 이용하였다. 이후 모의 저수지 수위와 실측 저수지 수위를 비교하여 영농시기를 조정하였다.

4.3. 물수지 해석 모형의 적용성 평가

가. 적용성 평가기법

저수지 해석 시스템이 개발이 되면 그 시스템이 실제 현장의 저수지의 농업용수 공급 및 방류패턴을 반영할 수 있는지를 평가할 필요가 있다. 기존의 DIROM, HOMWRS 등의 모형은 저수지 설계를 위해 주로 사용되었으며 실측치와 비교하여 모형의 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는지에 대한 연구는 부족하였다. Yoo et al. (2013)의 연구에서는 DIROM 모형을 이용하여 기후변화 및 토지이용변화에 따른 농업용 저수지의 미래 저수량 변화에 관한 연구를 수행한 바 있으나, DIROM의 매개변수의 불확실성에 의한 모의치의 불확실성에 대한 한계를 고찰한 바 있다.

본 연구에서는 우리나라에서 주로 이용되었던 DIROM 및 HOMWRS 등의 모형에서 문제가 되었던 부분을 개선하였다. 본 연구에서는 개발된 모형이 실제 저수지의 용수공급 및 방류패턴을 잘 반영하는지를 평가하기 위해서 고풍, 탑정, 고삼, 청천, 서성저수지에 대해 모의 저수지 수위와 실측 저수지 수위를 비교하였다. 모의 저수지 수위와 실측 저수지 수위를 비교하기 위한 방법으로 모형의 보정 및 검정방법을 선택하였다. 보정 및 검정을 수행하기 전에 주요 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 보정 및 검정결과를 평가하기 위해서 통계적 방법 및 도식적 방법을 동시에 이용하였다.

(1) 모형의 보정 매개변수

본 연구에서 개발한 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수는 크게 ① 저수지 유입량 (수정 3단 Tank 모형) 관련 매개변수, ② 농업용수 공급량 관련 매개변수, ③ 저수지 운영 관련 매개변수로 구분된다. 하지만 저수지 유입량의 경우, 우리나라 농업용 저수지 상류유역의 대부분이 미계측 지역인 점을 고려하면 실측치를 획득하기가 쉽지 않아 모형의 보정이 용이하지 않다. 농업용수 공급량 또한 일부 지역에 대해 간선수로 시점부에서 실측하고 있으나 대부분의 농업용 저수지는 계측하지 않고 있다. 일반적으로 대부분의 저수지에서는 수위를 측정하고 있다. 하지만 저수지 수위 하나의 요소에 대해 저수지 유입량과 농업용수 공급량 등을 동시에 보정하기는 쉽지가 않으며, 보정을 수행할 경우 보정된 매개변수의 불확실성이 커진다. 본 연구에서는 저수지 유입량 관련 매개변수는 보정하지 않았으며 김현영 (1988) 및 본 연구 개발 회귀식을 이용하여 관련 매개변수를 도출하였다. 저수지 운영 관련 매개변수는 대상지구의 영농특성 보고서 및 저수지 수위를 조사하여 이용하였다. 따라서 농업용수 공급량 관련 매개변수에 대해서만 보정하였다. 농업용수 공급량 관련 대표 매개변수는 <표 3-2-1>과 같으며 이중 이양용수량은 140 mm로 고정하여 이용하였고, 묘대용수량은 민감도가 굉장히 낮은 점을 고려하여 무시하였다. 즉, 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량, 관개효율에 대해서만 보정하였으며, 특히 앞선 [제 3 장 제 2 절 3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용]에서 추천했던 바와 같이 관개효율의 경우 연별로 보정을 수행하였다.

(2) 민감도 분석

본 연구에서는 보정 매개변수인 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량, 관개효율의 변화에 따라

농업용수 공급량뿐만 아니라 다른 저수지 물수지 요소인 제한수위 방류량 및 만수위 방류량에 대한 민감도 또한 조사하였다. 민감도 분석 방법은 앞선 [제 3 장 제 2 절 3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용]에서 서술한 바와 같은 상대 민감도 (Relative sensitivity, S_r)와 민감도 지수 (Sensitivity Index, SI)를 이용하였다. 마찬가지로 민감도를 평가하기 위한 기준 또한 Storm et al. (1988)과 Jesiek and Wolfe (2005)이 개발한 기준을 이용하였다.

(3) 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 최적화

저수지 물수지 및 모의조작은 많은 매개변수와 목적함수를 포함하고 있기 때문에 복잡하다 (Oliveira and Loucks 1997; Chen, 2003). 유전자 알고리즘 (GA)는 복잡한 시스템의 최적화 기법으로 많은 주목을 받았으며, 저수지 시스템의 경우에도 강력한 매개변수 최적화 기법으로 평가되고 있다 (Chang and Chen, 1998; Chen, 2003; Ahmed and Sarma, 2005; Nagesh Kumar et al, 2006; Louati et al., 2011). 유전자 알고리즘과에 관한 설명 및 저수지 해석 모형과의 연계에 관한 부분은 [제 3 장 제 4 절]에 자세히 서술하였다.

본 연구에서는 모의 저수지 수위의 결과가 실제 저수지 수위와 가장 일치하는 매개변수를 찾기 위해 유전자 알고리즘을 최적화 기법으로 선정하였으며 목적함수로 (모의치-실측치)²의 총합으로 선정하였고, 매개변수가 물리적 범위를 벗어나지 않도록 제약하기 위해 <표 3-2-1>에서 선정된 범위를 제약조건으로 설정하였다.

(4) 보정 및 검정 평가기법

모형의 보정 및 검정결과를 평가하기 위해 통계적 변량을 이용한 정량적 기법과 그래프 등의 도식적 자료를 이용한 정성적 기법을 동시에 이용하였다. 통계적 변량으로 RMSE (Root Mean Square Error), R^2 , NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency index), d (index of agreement)를 선정하였으며 자세한 식 및 설명은 [제 3 장 제 4 절]에 기술되어 있다. 도식적 기법으로 모의치 및 실측치의 시간적 변화를 그래프로 표현하여 오차의 크기 및 경향을 확인 방법과 모의치와 실측치의 산포도 그래프를 통해 상관관계와 상관식의 기울기를 확인하는 방법을 선정하였다.

나. 민감도 분석

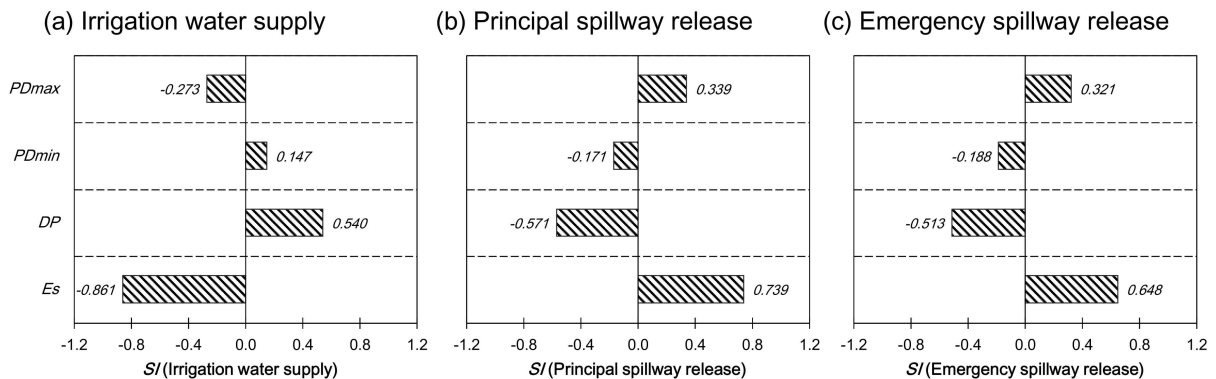
(그림 3-2-17)은 고풍저수지에 대해 관개효율 (E_s), 침투량 (DP), 최소담수심 (PDmin), 물꼬높이 (PDmax)의 변화에 따른 농업용수 공급량 (agricultural water supply), 제한수위 방류량 (Release from principal spillway), 만수위 방류량 (release from emergency spillway)의 민감도 지수를 산정한 결과이다.

농업용수 공급량은 [제 3 장 제 2 절 3. 농업용수 공급량 모의 모형의 개발 및 적용]에서와 같이 침투량과 최소담수심이 증가함에 따라 증가하였고, 관개효율과 물꼬높이가 증가함에 따라 감소하였다. 이에 관한 자세한 고찰은 해당 부분에 상세히 서술되어 있다. (그림 3-2-17)으로부터 농업용수 공급량은 관개효율, 침투량, 물꼬 높이 최소담수심의 순으로 민감한 것으로 나타났다. 또한 관개효율, 물꼬 높이, 침투량, 최소담수심은 민감도는 'moderately sensitive'로 나타났다.

제한수위 방류량 및 만수위 방류량의 관개효율, 침투량, 물꼬 높이, 최소담수심에 대한 민

감도의 부호는 농업용수 공급량과 반대로 나타났다. 이는 관개 효율 및 물꼬높이의 증가로 인해 농업용수 공급량은 감소하고, 이로 인해 저수지의 저수량이 증가하여 더 많은 저수지 유입량이 여수로 또는 수문을 통해 방류될 수 있기 때문으로 사료된다. 만수위 방류량 및 제한수위 방류량은 4개 매개변수에 대해 ‘moderately sensitive’로 나타났으나, 관개효율은 각각 0.648과 0.739로 나타나 다른 매개변수에 비해 특히 더 민감한 것으로 분석되었다.

본 연구결과를 통해 관개효율은 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량의 모의에 있어서 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 관개효율은 기상, 영농방법, 저수지 운영자의 관행 물관리 등에 영향을 많이 받는 인자로 시간에 따라 변하는 매개변수이다 (Kim et al., 2005; Howell, 2003). Kangrang and Chaleeraktragoon (2007)과 Wu and Chen (2012)에 따르면 시간에 따라 변하는 특성을 가지는 매개변수의 경우 고정된 매개변수 값을 이용하는 것보다 시간에 따라 매개변수를 변화시켜주는 것을 추천하고 있다. 본 연구에서는 관개효율 매개변수를 고정된 값으로 보정시키는 것이 아니라 연마다 다른 값을 가질 수 있도록 설정하여 보정하였다 (Scheme I, II).



(그림 3-2-17) 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수에 따른 민감도 분석 결과

다. 최적 매개변수 선정 및 저수지 운영 방법별 모의결과 비교

본 연구에서 개발한 저수지 물수지 해석 모형의 적용성 평가를 위해 대상저수지인 고평, 탐정, 고삼, 청천저수지에 대해 저수지 물수지 요소를 모의하였고 실측 저수지 수위와 비교하였다. 모형의 평가를 위해서는 통계적 변량과 도식적인 방법을 동시에 이용하였다. 또한, 기존의 연구에서는 고려하지 않았던 연단위 관개효율 변화 및 홍수기 제한수위 운영에 따른 저수지 물수지 해석의 모의 능력 향상을 평가하였다. 모형의 보정기간은 2011~2012년으로 설정하였으며 최적 매개변수의 결정은 유전자 알고리즘을 이용하였다. 매개변수는 <표 3-2-1>의 범위에서 목적함수인 SSR이 최소화되도록 보정되었으며, 그 결과는 <표 3-2-9>와 같다. <표 3-2-9>에서와 같이 관개효율은 연별로 보정하였다.

홍수기 제한수위 운영과 연단위 관개효율 변화의 중요성을 평가하기 위하여 선정된 최적 매개변수와 홍수기 제한수위를 모두 고려하여 모의하는 경우 (Scheme I)와 Scheme I에서 홍수기 제한수위를 고려하지 않고 모의하는 경우 (Scheme II), 그리고 Scheme I에서 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않고 모의하는 경우 (Scheme III)를 구분하고 비교·평가하였다.

(그림 3-2-18)은 보정기간 동안의 실측치와 Sceme I, II, III의 모의치를 시계열로 비교하여 보여주고 있고, (그림 3-2-19)는 보정기간 동안의 Scheme I, II, II의 산포도를 보여주고 있다.

(그림 3-2-18)을 통해 정성적으로 평가하면 Scheme I의 모의 수위가 Scheme I 및 II의 결과보다 실측 수위의 경향을 잘 반영하여 모의가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 4월 또는 5월의 관개 시작 시기에 하강한 모의 수위는 Scheme III가 Scheme I에 비해 더 높거나 낮은 것을 확인할 수 있다. Scheme III가 Scheme I에 비해 수위가 더 높게 나타나는 이유는 Scheme III의 관개효율 매개변수가 Scheme I에 비해 더 높은 값이 적용되어 더 적은 양의 농업용수 공급량이 방류되었고, 이러한 요소가 저수지 수위에 영향을 미쳤기 때문이다. 마찬가지로 해당 시기의 Scheme III 수위가 Scheme I에 비해 더 낮게 나타나는 경우는 관개효율 매개변수가 더 낮은 값이 적용되었기 때문이다. 결론적으로, Scheme I의 모의 수위가 Scheme II 및 III에 비해 실측 수위와 유사하게 나타나고 있으며, 이는 관개효율의 연별 변화를 고려하고 있기 때문이다.

농업용수 공급으로 인해 하강한 저수지 수위는 7월~8월에 상대적으로 큰 저수지 유입량으로 인해 급격히 상승한다. 이 시기는 제한수위 관리기에 해당하기 때문에 Scheme I 모의 수위는 제한수위까지 상승하였고, 이는 실측 수위의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 하지만 Scheme II의 모의 수위는 만수위까지 상승하였고, 이는 제한수위 운영을 고려하지 않기 때문이다.

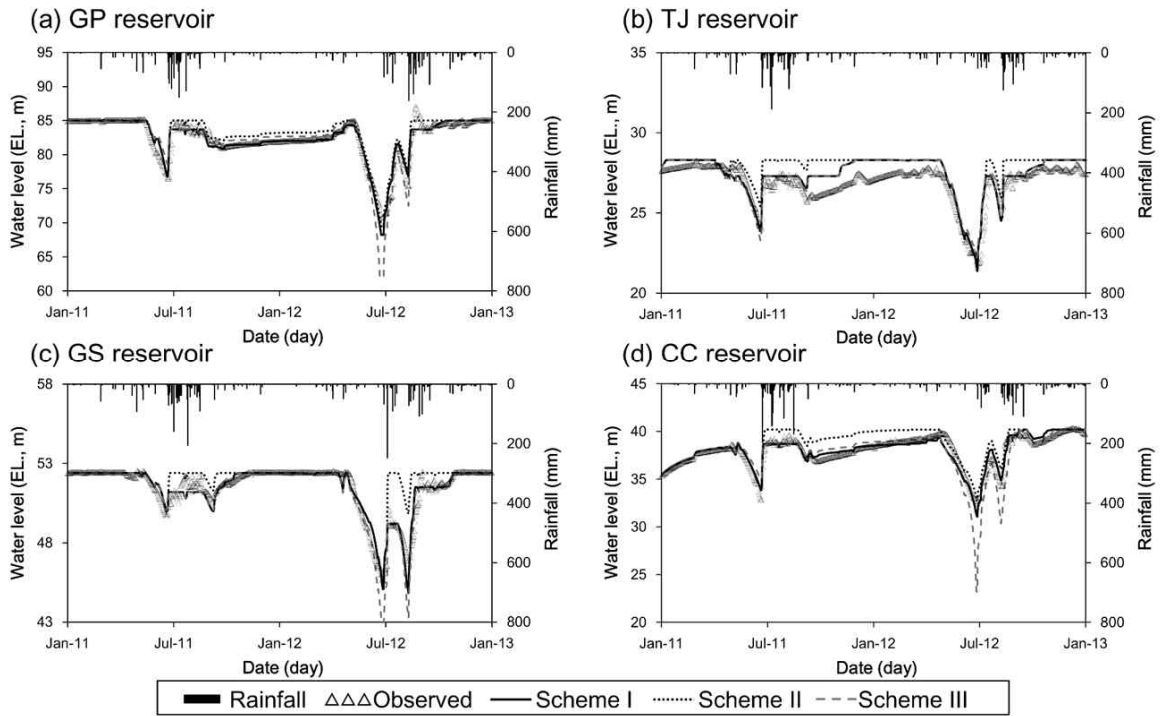
(그림 3-2-19)에서의 산포도 분석 결과, Scheme I의 결과가 Scheme II 및 III에 비해 관측치에 더 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Scheme I의 추세선의 기울기가 1:0.92~1:0.95로 Scheme II 및 III에 비해 더 1:1에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수가 있다.

<표 3-2-10>은 통계적으로 평가한 결과를 보여주고 있으며, NSE는 Scheme I에 대해 0.66~0.93, Scheme II에 대해 0.27~0.86, 그리고 Scheme III에 대해 0.44~0.85로 나타났다. RSR의 경우 Scheme I, II, 그리고 II에 대해 각각 0.27~0.59, 0.37~0.86, 그리고 0.39~0.75로 나타났다. 전체적인 통계 지표를 통한 평가 결과는 Scheme I이 우수하게 나타났으며, 이는 연단위 관개효율 변화와 홍수기 제한수위 운영을 고려하고 있기 때문이다. Moriasi et al. (2007)의 기준에 따라서도 고풍, 고삼, 청천 저수지는 NSE가 0.75 이상으로, RSR이 0.50 이하로 나타나 “very good”으로 평가할 수 있다.

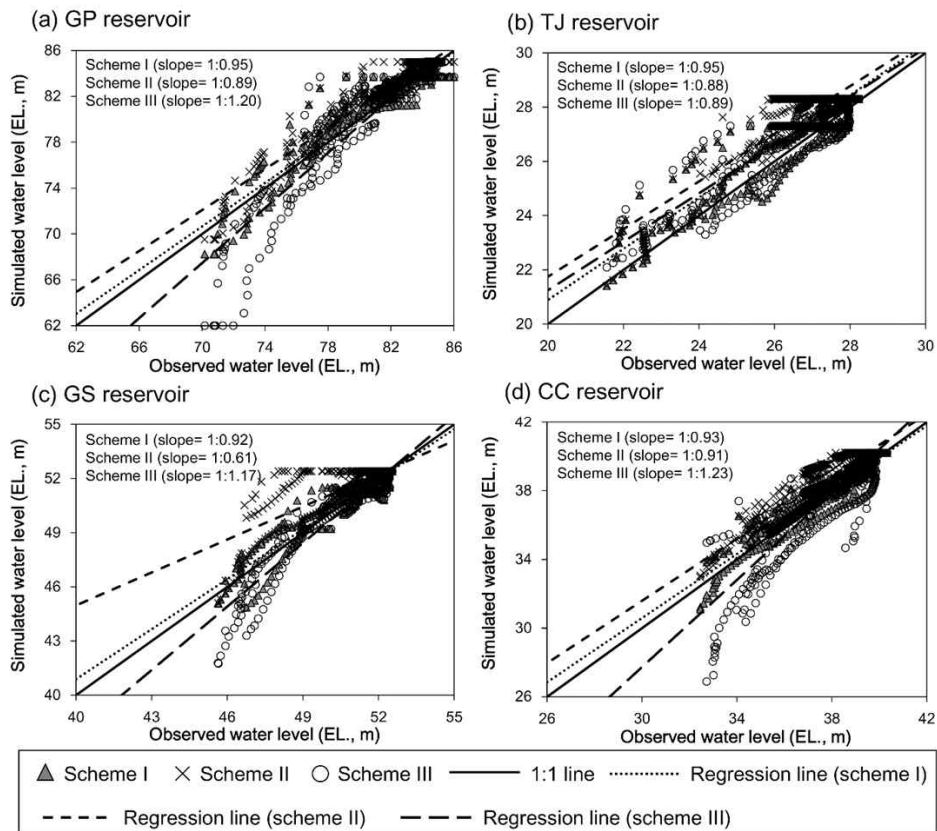
정성적 및 정량적 평가 결과, Scheme I의 운영 기준 결과가 Scheme II 및 III에 비해 실측결과에 더 유사하게 나타났으며, 본 연구 결과를 통해 제한수위를 실제로 운영하는 저수지에서는 이에 대한 운영을 고려한 모의가 필요하고, 실측 저수지 수위가 확보된 저수지에 대해서는 관개효율을 연단위로 보정이 필요하다는 점을 확인할 수 있었다. 추가적으로 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량 등의 매개변수 또한 보정이 잘 이루어진 것으로 사료된다.

<표 3-2-9> 저수지 물수지 모형의 최적 매개변수 선정

Parameter		보정치				
		고풍저수지	탑정저수지	고삼저수지	청천저수지	
농업용수 공급량 매개변수	물꼬 높이 (mm)	84	68	65	74	
	최소 담수심 (mm)	32	35	40	30	
	침투량 (mm)	4	2.3	1.7	2.9	
	관개효율 (%)	2011	55	90	70	62
		2012	64	70	85	82



(그림 3-2-18) 보정기간 동안의 실측치 및 모의치 시계열 비교 (Scheme I, II, III)



(그림 3-2-19) 보정기간 동안의 산포도 (Scheme I, II, III)

<표 3-2-10> 대상저수지의 보정기간동안의 통계적 변량 산정 결과

Reservoir	Scheme	Statistical terms		
		R ²	NSE	RSR
GP	I	0.93	0.93	0.27
	II	0.92	0.86	0.37
	III	0.87	0.75	0.50
TJ	I	0.83	0.66	0.59
	II	0.79	0.27	0.86
	III	0.8	0.63	0.61
GS	I	0.92	0.92	0.28
	II	0.65	0.56	0.66
	III	0.92	0.85	0.39
CC	I	0.9	0.9	0.32
	II	0.81	0.53	0.68
	III	0.77	0.44	0.75

라. 모형의 검정

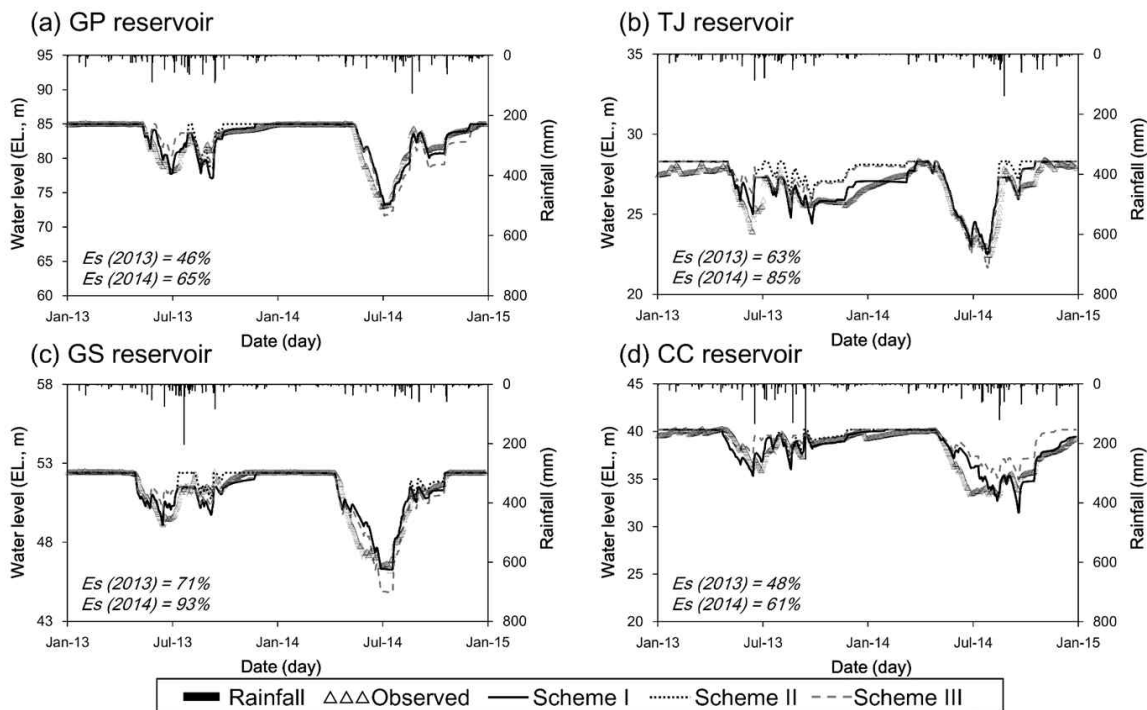
(그림 3-2-20)은 검정기간 (2013~2014년)동안의 실측결과와 Scheme I, II, III의 모의 결과를 시계열로 비교하여 보여주고 있고, <표 3-2-11>은 통계 지표 산정 결과를 보여주고 있다. 관개효율을 제외한 물꼬높이, 최소담수심, 침투량은 보정된 값이 그대로 적용되었다. 관개효율 매개변수는 SSR이 최소가 되도록 연별로 다시 조정을 하여 2013년과 2014년의 값을 도출하였으며, 이는 Scheme I과 II에 적용되었다. Scheme III는 보정기간과 동일한 관개효율 값이 적용되었으며, 연단위 변화를 고려하지 않았다.

<표 3-2-11> 대상저수지의 검정기간동안의 통계적 변량 산정 결과

Reservoir	Scheme	Statistical terms		
		R ²	NSE	RSR
GP	I	0.89	0.89	0.34
	II	0.89	0.89	0.33
	III	0.8	0.77	0.48
TJ	I	0.85	0.79	0.46
	II	0.81	0.48	0.72
	III	0.79	0.59	0.64
GS	I	0.9	0.89	0.33
	II	0.9	0.89	0.33
	III	0.87	0.86	0.38
CC	I	0.82	0.81	0.44
	II	0.82	0.8	0.44
	III	0.78	0.52	0.69

검정기간 동안의 모의 수위 또한 보정기간과 비슷하게 연단위 관개효율 변화를 고려한 Scheme I이 고려하지 않은 Scheme III에 비해 실측 수위에 더 유사하게 나타났다. 그러나 보정기간과 달리 검정기간에서는 탐정 저수지를 제외하고는 Scheme I와 Scheme II의 차이가 크지 않았다. 이는 제한수위 관리기 동안 제한수위 또는 만수위를 유지하는 기간이 상대적으로 짧았기 때문이다. 짧은 기간의 원인은 농업용수 공급량이 상대적으로 많았던 점과, 유입량

은 상대적으로 적었던 것이 동시에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 탐정 저수지에서는 통계 지표 산정 결과가 Scheme I이 II보다 좋게 나타나고 있다.



(그림 3-2-20) 검정기간 동안의 실측치 및 모의치 시계열 비교 (Scheme I, II, III)

마. 저수지 물수지 분석

대상 저수지별 최적 매개변수를 이용하여 물수지 분석을 수행하였다. 저수지 운영기준으로 연단위 관개효율 변화와 제한수위 운영을 고려하는 Scheme I이 이용되었다. 대상저수지에 대한 물수지 요소별 분석 결과는 (그림 3-2-21)에 월단위로 정리하였으며, <표 3-2-12>에 연단위로 정리하였다.

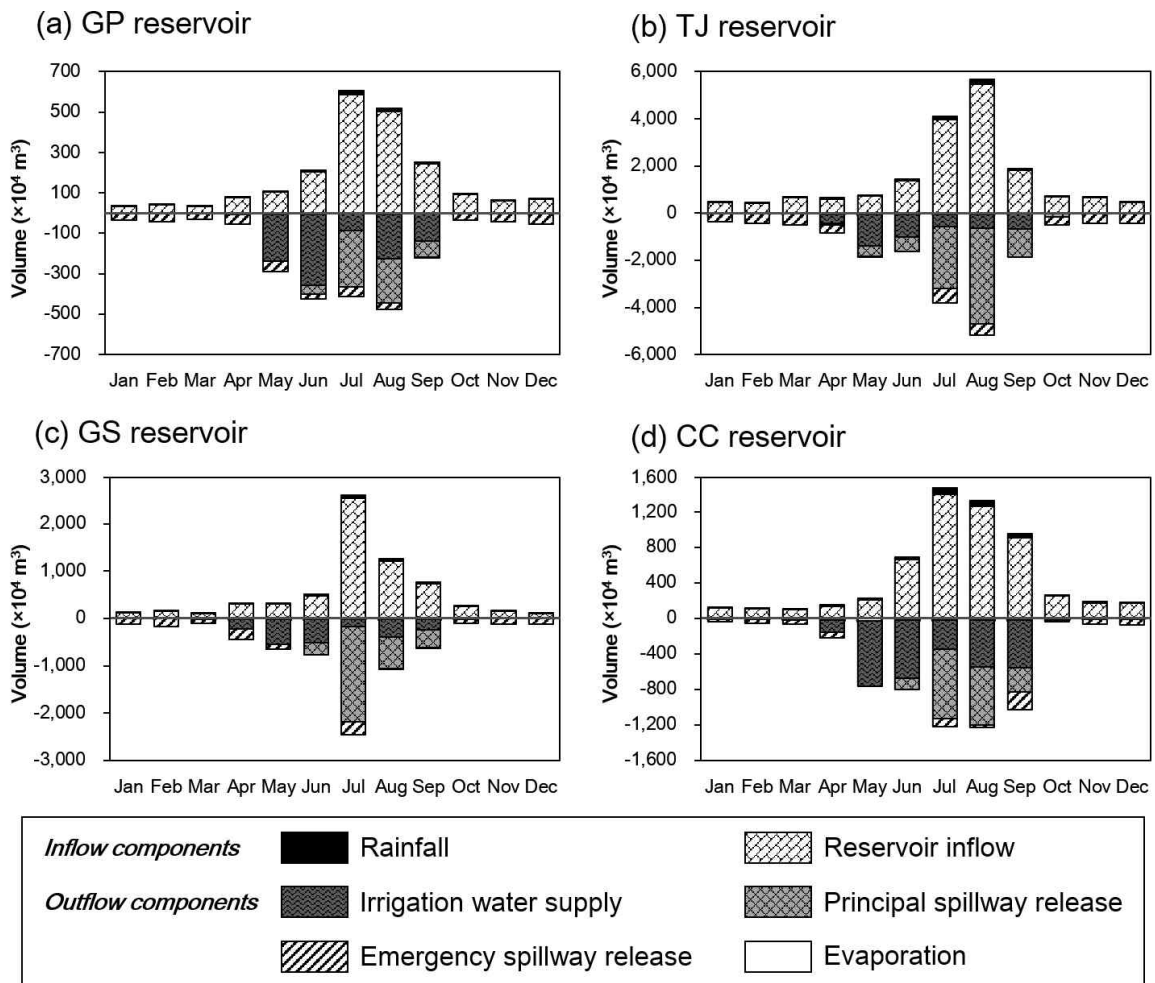
평균적으로 유입성분의 95~97%가 상류유역으로부터의 저수지 유입량인 것으로 나타났다 <표 3-2-12>. 선행연구에서의 저수지 유입량 비율은 Kummur et al. (2014)이 88%로 Kebede et al. (2006)이 44%로 보고하고 있으며, 이는 본 연구 결과 보다 낮은 수치이다. 월단위로 평가하면 7월~9월에 많은 양이 유입되는 것을 확인할 수 있다 (그림 3-2-21). 저수지 유입성분 중 강우의 연평균 값은 $67 \sim 601 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ 의 범위로 저수지별로 차이가 나타나는데, 이는 <표 3-2-7>과 같이 강우계로 측정값이 1,350~1,450 mm로 유사한데 비해 (그림 3-2-17)에서와 같이 저수지마다 표면적의 차이가 나기 때문으로 사료된다.

유출 성분 중 농업용수 공급량은 25~52%를 차지하는 것으로 나타났다. 선행연구에서는 Jang et al. (2012)가 15%로 보고하고 있으며, 본 연구보다 작게 나타난다. 이는 Jang et al. (2012)의 대상 저수지는 $8.3 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ 으로 규모가 상당히 크고, 농업용수 공급뿐만 아니라 생활용수 및 공업용수로도 이용되기 때문으로 사료된다. 농업용수 공급량의 월별 경향을 살펴보면 영농기인 5~9월에 많은 양이 방류되는 것을 확인할 수 있다 (그림 3-2-21). 그러나 농업

용수 공급량의 월별 변화 경향은 저수지별로 차이가 나타나는데, 이는 <표 3-2-8>과 같이 월별 강우량이 지역별로 차이가 나타났고, 또한 <표 3-2-9>와 같이 최소담수심 및 물꼬 높이 등이 저수지별로 다르게 보정되었는데, 이는 유효우량에 영향을 미치기 때문이다. 일반적으로 유효우량이 감소하면 농업용수 공급량은 증가한다.

유출성분 중 제한수위 방류량과 만수위 방류량이 차지하는 비율은 각각 29~51%와 11~21%로 나타났다. 제한수위 방류량 및 만수위 방류량은 저수지 하류지구의 유출량 성분을 구성하는 중요한 요소로 작용한다.

증발량의 비율은 2~3%로 나타났다. 이와 같이 낮은 값은 저수지 상류유역 면적에 비해 저수지 표면적이 굉장히 작기 때문이다. 선행연구에서의 특정지역의 경우 수자원 관리에서 있어 저수지 증발량이 굉장히 중요한 요소로 작용하나 (Tanny et al., 2008; Lowe et al. 2009), 본 연구 대상 저수지의 경우 증발에 의한 유출은 무시할만한 요소로 사료된다.



(그림 3-2-21) 대상저수지의 월평균 물수지 분석 결과

<표 3-2-12> 대상저수지의 연단위 물수지 분석 결과

저수지	시간	유입 성분			유출 성분					수지 ($\times 10^4 \text{ m}^3$)
		강우	저수지 유입	합계	증발	농업용수 공급량	만수위 방류량	제한수위 방류량	합계	
		($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	($\times 10^4 \text{ m}^3$)	
고풍	2011	83	2,818	2,901	42	927	670	1,422	3,062	-161
	2012	75	2,536	2,611	45	1,020	458	928	2,450	161
	2013	63	1,682	1,745	45	1,206	358	136	1,745	0
	2014	47	1,165	1,211	40	932	236	3	1,211	0
	평균	67	2,050	2,117	43	1,021	431	622	2,117	
	%	3%	97%		2%	48%	20%	29%		
탐정	2011	908	28,925	29,833	409	3,581	6,846	18,634	29,470	363
	2012	607	18,551	19,158	416	4,179	2,951	11,613	19,158	0
	2013	409	9,411	9,820	418	5,411	2,093	2,605	10,527	-707
	2014	479	12,388	12,867	395	4,531	3,380	3,854	12,160	707
	평균	601	17,319	17,920	410	4,425	3,817	9,177	17,829	
	%	3%	97%		2%	25%	21%	51%		
고삼	2011	455	10,632	11,087	192	1,549	2,469	6,877	11,087	0
	2012	291	7,045	7,335	180	2,310	943	3,902	7,335	0
	2013	295	5,625	5,919	184	2,192	1,114	2,430	5,919	0
	2014	153	2,456	2,609	171	1,857	459	122	2,609	0
	평균	298	6,439	6,737	182	1,977	1,246	3,333	6,737	
	%	4%	96%		3%	29%	18%	49%		
청천	2011	404	8,447	8,851	187	2,188	395	5,393	8,164	687
	2012	299	5,174	5,473	203	2,545	1,080	1,212	5,039	435
	2013	330	5,223	5,553	211	3,894	775	732	5,612	-58
	2014	201	3,197	3,398	176	3,086	270	0	3,532	-134
	평균	309	5,510	5,819	194	2,928	630	1,834	5,587	
	%	5%	95%		3%	52%	11%	33%		

5. 농업용 저수지 수질 해석기법

본 절에서는 농업용 저수지의 수질 모의에 적용할 수 있는 수질 해석 기법을 조사 및 분석하였다. 수문 및 수질 측정 자료가 미비한 우리나라 농업용 저수지의 현실을 고려하고, 향후 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용이 용이하도록 비교적 간단하게 사용할 수 있는 ARSIM-rev, BATHTUB 및 EUTROMOD 모형의 이론적 배경을 정리하였다. 향후 각 방법의 편의성, 적용성 등을 종합적으로 분석하여 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용하고자 한다.

5.1. ARSIM-rev

함종화 등 (2012)은 농업용 저수지 수질관리를 목적으로 적은 입력자료로 짧은 시간 내에 농업용 저수지 수질을 모의할 수 있는 저수지 저수지 수질모델 (ARSIM-rev)을 개발하였다. ARSIM-rev는 농업용 저수지로 유입된 물질은 저수지 전체에 대해 균일한 농도로 분포한다고 가정하여 단순-완전혼합모델 (0차원 모델)형태로 개발되었다. 또한, 동물성 플랑크톤 이상의 상위 생물상에 대한 영향은 모델에 고려하지 않았으며, 물질의 물리, 화학, 생물학적 변화는 대부분의 모델에서와 같이 1차 반응으로 해석하였다. 또한 반응식에서 미분식을 계산하기 위해 Euler방법에 비해 상대적으로 정확한 값을 얻을 수 있는 Runge Kutta 4차 방법을 사용하여 Visual BASIC 6.0으로 개발되었다.

가. 물수지 방정식

저수지 물수지는 유입량과 유출량을 주어진 시간단위별로 저수량 또는 저수지 수위를 추적하기 위해 사용되는데, 이는 연속방정식에 의해 식 (3-2-13)과 같이 표시될 수 있다. 총방류량 (Out_t)은 저수지 무효방류량, 농업용수 이용량, 기타 용수 이용량, 기타 손실량의 합으로 표현될 수 있으나, 각각을 구분하여 산정하기 쉽지 않아 총 방류량만을 이용하여 물수지방정식을 만들었다.

$$V_t = V_{t-1} + In_t + P_t - E_t - Out_t \quad (3-2-13)$$

여기서, V_t , V_{t-1} = t , $t-1$ 일의 저수량, In_t = 유역으로부터 유입량, P_t = 수면강수량, E_t = 수면증발량, Out_t = 총방류량이다.

수면강수량과 증발량은 기상자료를 이용하여 계산되도록 하였으며, 유입량과 방류량은 직접 입력하도록 하였다. 하지만 대부분의 농업용 저수지에서 방류량이 실측되지 않기 때문에, 총방류량을 직접입력 방법 외에 식 (3-2-13)을 식 (3-2-14)와 같이 변형하여 일별 실측한 저수율을 입력받아 총방류량을 자동으로 추정할 수 있도록 하였다. 또한 실측한 방류량 및 저수량자료가 모두 없는 경우에는 저수량변화가 없는 것 ($V_{t-1} - V_t = 0$)으로 가정하여 식 (3-2-15)와 같이 수정하여 총방류량을 자동으로 추정하여 입력되도록 하였다.

$$\begin{aligned} Out_t &= (V_{t-1} - V_t) + In_t + P_t - E_t \\ &= V(R_{t-1} - R_t) + In_t + P_t - E_t \end{aligned} \quad (3-2-14)$$

여기서, V = 총저수량, $R_t, R_{t-1} = t, t-1$ 일의 저수율이다.

$$Out_t = In_t + P_t - E_t \quad (3-2-15)$$

나. 수온모의 방정식

저수지의 수온은 화학적, 생물학적 반응의 속도에 매우 커다란 영향을 미치는 항목으로 시간에 따른 수온변화를 모의하기 위해 Chapra (1997)가 제시한 식 (3-2-16)을 이용하였다. 식 (3-2-16)에서 저수지의 수온은 유입수 및 방류수의 수온, 순수태양열, 대기의 장파장, 물의 장파장, 전도, 증발에 의해 변화된다.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = & \frac{Q_{in}}{V} T_{in} - \frac{Q_{out}}{V} T + \frac{J_{sn}}{\rho C_p H} \\ & + \frac{\sigma(T_{air} + 273)^4(A + 0.031\sqrt{e_{air}})(1 - R_L)}{\rho C_p H} \\ & - \frac{\epsilon\sigma(T + 273)^4}{\rho C_p H} - \frac{c_1 f(U_w)(T - T_{air})}{\rho C_p H} \\ & - \frac{f(U_w)(e_s - e_{air})}{\rho C_p H} \\ e_s = & 4.596e^{\frac{17.27T_{air}}{237.3 + T_{air}}}, e_{air} = \frac{e_s \cdot R_h}{100}, f(U_w) = 19.0 + 0.95U_w^2 \end{aligned} \quad (3-2-16)$$

여기서, T, T_{in}, T_{air} = 저수지, 유입수 및 공기 온도($^{\circ}\text{C}$), Q_{in}, Q_{out} = 저수지 유입량 및 방류량 (m^3/d), V = 저수지의 체적 (m^3), A = 저수지 수표면적 (m^2), H = 수심 (m), ρ = 물의 밀도 (kg/m^3), C_p = 물의 비열 ($\text{J}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$), J_{sn} = 순 태양 단파장 ($\text{J}/\text{m}^2/\text{d}$), σ = Stefan-Boltzmann 상수 = $4.9 \times 10^{-3} \text{J}/\text{m}^2/\text{d}/\text{K}^4$, e_s, e_{air} = 공기의 수증기압 및 포화 수증기압 (mm Hg), R_L = 반사계수 (대략 0.03), e = 물의 복사율 (대략 0.97), U_w = 풍속 (m/s), $f(U_w)$ = 수표면 위에서 풍속에 의한 열전달의 의존도, R_h = 상대습도 (%)이다.

다. 물질수지 방정식

모델에 적용되는 기본 물질수지식은 식 (3-2-17)과 같다. 식 (3-2-17)에서 첫 번째 항은 외부로부터 유입되는 부하량을 표시하고, 하천으로부터 유입, 강우로부터 유입 등이 포함된다. 두 번째 항은 저수지내에서 물질의 증가 및 감소를 나타내는 것으로 증식, 사멸, 침강, 퇴적층으로부터 용출 등이 고려된다.

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = \sum_m W_{im} + \sum_n S_{in} \quad (3-2-17)$$

여기서, V_i = 저수지의 체적 (m^3), C_i = 저수지의 평균물질농도 (mg/L), W_{im} = 외부로부

터 저수지로 유입되는 부하량 (g/d), m = 외부 유입부하량의 종류, n = 모델 내에서 물질의 반응식 종류를 나타낸다.

라. 수질변화 방정식

저수지 내의 수질은 유입 및 유출 이외에 침강과 용출, 유기염류의 무기화, 식물플랑크톤의 증식과 사멸 등의 작용에 의해 변화된다.

식물플랑크톤 성장률 (GR)을 계산하기 위해 필요한 광소멸계수 (K_e , Light extinction)는 WASP에서 일단위로 직접 입력하도록 되어 있으나, 일단위의 광소멸계수를 산정하여 입력하기 쉽지 않다. 그러므로 ARSIM-rev에서는 CE-QUAL-W2에서 사용된 여러 광소멸계수 계산 방법 중 Chapra (1997)가 제시한 식 ($K_e = 1.5/TR$)을 사용하여 투명도 값을 입력하면 모델 내부적으로 광소멸계수가 계산되도록 하였다. 월별 변화를 고려하기 위해 연평균 투명도에 월별 투명도 가중치를 적용하여 월별 광소멸계수가 계산되도록 하였다. WASP에서는 광도의 단위로 Langley/day를 사용하도록 되어 있으나, 국내 기상청에서 제공되는 광도 단위와 달라 입력에 어려움이 있어 ARSIM-rev에서는 Langley/day대신 $MJ/m^2/d$ 를 사용하도록 하였다.

WASP에서 CBOD, Org-N, Org-P의 개별 침강속도는 입력된 유기물의 침강속도에 각 구획 (segment)별 CBOD, Org-N, Org-P의 비용존성 비율을 각각 곱하여 개별 침강속도를 계산하는 반면, ARSIM-rev는 CBOD, Org-N, Org-P의 침강속도를 각각 직접 입력하도록 하였다.

WASP에서 퇴적층으로부터 용출되는 NH_3-N ($TFNH_3$)과 PO_4-P ($TFPO_4$)양은 일단위로 입력된 퇴적층으로부터 용출되는 NH_3-N 과 PO_4-P 양에 각 구획별로 입력된 계수 (FNH_3 , FPO_4)를 곱하여 계산하는 반면, ARSIM-rev는 WASP의 SOD (퇴적층산소소비율)과 같이 입력된 연평균 단위면적당 용출되는 NH_3-N (R_{wN})과 PO_4-P (R_{wP}) 평균수심 (D) 으로 나눠 NH_3-N 과 PO_4-P 용출량이 계산되도록 하였다.

WASP에서 식물플랑크톤, 유기물, 무기물의 침강속도, NH_3-N 과 PO_4-P 의 퇴적물로부터 용출량 및 SOD를 일단위로 입력하도록 되어 있지만, ARSIM-rev에서는 연평균 값을 입력하도록 하였다. WASP에서와 같이 일단위로 입력할 경우 일별로 다른 침강속도, 용출량 및 SOD를 입력할 수 있어 쉽게 실측값과 유사하게 모델을 보정할 수 있는 장점이 있지만, 실제 일 단위 값을 입력하는 것이 매우 어려워 대부분의 모델에서 보정을 위한 인자로 사용되는 것이 현실이다.

또한 WASP에서는 식물플랑크톤 내 탄소의 함량을 구하기 위해 Chl-a 농도에 Chl-a 1 mg에 포함된 탄소량을 의미하는 CCHL (mgC/mgChl-a)을 곱하여 탄소함량을 계산하고, 질소와 인의 함량은 계산된 탄소함량에 NCRB (mgN/mgC)와 PCRB (mgP/mgC)를 곱하여 산정한다. 이 방법은 탄소의 함량을 계산하는 방법과 질소, 인의 함량을 계산하는 방법이 서로 달라 혼돈의 우려가 있어, ARSIM-rev에서는 일반적으로 많이 사용하는 식물플랑크톤내 탄소, 질소, 인의 함량비를 나타내는 HCA (mgC/mgChl-a), HNA (mgN/mgChl-a), HPA (mgP/mgChl-a) 값을 이용해 식물플랑크톤 내 탄소, 질소, 인의 함량을 산정하였다.

재폭기계수 K_a 는 다양한 식으로 계산할 수 있는데, ARSIM-rev에서는 CE-QUAL-W2에서 호소에 적합하다고 추천하는 14개의 식 풍속 (W)과 수심 (D)을 이용한 식 ($K_a = (0.728 W^{0.5} - 0.317 W + 0.0372 W^2)/D$)을 사용하여 계산하였다.

(1) 식물플랑크톤

본 모델에서 식물플랑크톤의 총 발생량은 대부분의 모델이 채택하고 있는 Chl-a 농도로 모의하도록 하였다. 식물플랑크톤은 광합성에 의한 성장과 내생호흡, 사멸, 침강, 동물플랑크톤에 의한 포식 등으로 감소하며, 그 반응식은 식 (3-2-18)과 같다. 식물플랑크톤의 성장은 식 (3-2-19)와 같이 수온, 광도, 영양염류 (N, P)의 농도에 의해 최대성장률 (K_{1C})이 점차 감소되도록 하였다. 영양염류 중 DIN (용존무기질소)과 DIP (용존무기인)의 농도가 성장제한인자라고 판단하여 이 두 영양염류에 대하여 식 (3-2-20)과 같이 Michaelis-Menten의 식을 적용하고, Liebig의 최소율의 법칙에 따라 N과 P의 농도 중에서 보다 많이 제한되는 영양염류의 제한계수를 택하였다. 식물플랑크톤은 보통 내생호흡, 사멸, 침강 및 동물플랑크톤에 의한 포식 등에 의해 감소하는데, 호흡과 사멸에 의한 감소는 식 (3-2-21)과 같이 표현하였으며, 침강에 의한 감소는 식 (3-2-22)와 같이 나타냈다. 그러나 동물플랑크톤 포식에 의한 감소는 계산이 용이하지 않아 고려하지 않았다.

$$\frac{dCHLA}{dt} = (GR - DR - ST) \cdot CHLA \quad (3-2-18)$$

$$GR = K_{1C} \cdot f(T) \cdot f(L) \cdot f(N, P)$$

$$f(T) = K_{1T}^{(T-20)}$$

$$f(L) = \frac{2.718}{K_e \cdot D} \cdot f_d \cdot \left[\exp\left\{-\frac{I_0}{I_{s2}} \cdot \exp(-K_e \cdot D)\right\} - \exp\left(-\frac{I_0}{I_{s2}}\right) \right]$$

$$I_a = f_d \cdot 37.247 + 5.1933, \quad I_0 = 0.9 \cdot \frac{I_a}{f_d}, \quad K_e = 1.5/TR \quad (3-2-19)$$

$$f(N, P) = \text{Min}\left(\frac{DIN}{K_{MNG1} + DIN}, \frac{DIP}{K_{MPG1} + DIP}\right) \quad (3-2-20)$$

$$DR = K_{1RC} \cdot K_{1RT}^{(T-20)} + K_{1D} \quad (3-2-21)$$

$$ST = V_{CHLA}/D \quad (3-2-22)$$

여기서, CHLA = 식물플랑크톤 농도 (mg/m^3), GR = 성장률 (1/d), DR = 호흡 및 사멸률 (1/d), ST = 침강률 (1/d), K_{1C} =20 °C에서 식물플랑크톤의 최대성장률 (1/d), $f(T)$ = 온도보정 함수, $f(L)$ = 광도에 의한 보정 함수, $f(N, P)$ = N 및 P의 농도에 의한 보정 함수, K_{1T} = K_{1C} 의 온도보정계수, f_d = 하루 중 낮 시간의 비율 (일조시간/24), D = 수심 (m), $I_a \cdot I_0$ = 지표면과 수면 바로 아래에서의 일평균 광도 ($MJ/m^2/d = 23.9 \text{ langley/d}$), I_{s2} = 광합성 포화광도 ($MJ/m^2/d$), TR = 연평균투명도 (m), K_e = 수중에서의 광소멸계수

(1/m), $K_{MNG1}, K_{MPG1} = N$ 과 P 의 반포화농도 (mg/L), DIN, DIP=용존 무기질소 및 용존 무기인 농도 (mg/L), $K_{1RC}=20$ °C에서의 호흡률 (1/d), $K_{1RT} = K_{1RC}$ 의 온도보정계수, $K_{1D} =$ 자연적인 사멸률 (1/d), $V_{CHLA} =$ 식물플랑크톤의 침강속도 (m/d)이다.

(2) 질소

식물플랑크톤의 호흡 및 사멸, 분해에 의해 NON과 NH₃-N이 증가하며, 성장에 의해 NH₃-N과 NO₃-N이 감소되고 식물플랑크톤에 포함된 유기질소 (CHLA-ON)가 증가된다. 호기성 조건에서 질산화에 의해 NH₃ → NO₂ → NO₃로 변환되며, 혐기성 조건에서 탈질작용에 의해 NO₃ → N₂로 변환된다. 또한, 유기질소의 침강과 바닥으로부터 NH₃의 용출이 일어난다. 이상의 조건들을 근거로 하여 NON, NH₃-N, NO₃-N에 대한 모델 내 반응식을 나타냈으며, NO₂-N의 농도는 농업용 저수지에서 매우 낮기 때문에 본 모델에서는 NO₂-N과 NO₃-N을 합하여 NO₃-N으로 고려하였다.

$$\frac{dCHLA-ON}{dt} = CHLA \cdot H_{NA}/1000 \quad (3-2-23)$$

$$\begin{aligned} \frac{dNON}{dt} = & DR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot f_{ON} \\ & - K_{71C} \cdot K_{71T}^{T-20} \cdot NON \cdot \\ & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} \\ & - \frac{V_{NON}}{D} \cdot NON \end{aligned} \quad (3-2-24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dNH_3}{dt} = & - GR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot P_{NH_3} \\ & + DR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot (1 - f_{ON}) \\ & + K_{71C} \cdot K_{71T}^{T-20} \cdot NON \cdot \\ & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} - K_{12C} \cdot \\ & K_{12T}^{T-20} \cdot NH_3 \cdot \frac{DO}{K_{nit} + DO} + \frac{R_{wN}}{D} \cdot R_{wNT}^{(T-20)} \end{aligned} \quad (3-2-25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dNO_3}{dt} = & - GR \cdot (CHLA \cdot H_{NA}/1000) \cdot (1 - P_{NH_3}) \\ & + K_{12C} \cdot K_{12T}^{T-20} \cdot NH_3 \cdot \frac{DO}{K_{nit} + DO} \\ & - K_{20C} \cdot K_{20T}^{T-20} \cdot NO_3 \cdot \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + DO} \end{aligned} \quad (3-2-26)$$

여기서, $H_{NA} =$ 식물플랑크톤 세포내의 N 성분비율 (mgN/mgChl-a), $f_{ON} =$ 식물플랑크톤의 사멸 및 분해로 인해 발생하는 T-N에 대한 ON의 비율, $K_{71C} =$ 유기성 질소의 분해율 (1/d), $K_{12C} =$ 암모니아성 질소의 산화율 (1/d), $K_{20C} =$ 질산성 질소의 탈질률 (1/d), $K_{71T}, K_{12T}, K_{20T} = K_{71C}, K_{12C}, K_{20C}$ 의 온도 보정계수, $A_b =$ 저수지 퇴적층의 면적 (m^2),

V = 저수지 체적 (m^3), V_{NON} = 유기질소 (NON)의 침강속도 (m/d), K_{MPHYT} = 식물플랑크톤의 반포화 상수 (mgC/L) 일반적으로 0 입력, $R_{wN=NH_3-N}$ 의 용출계수 ($gN/m^2/d$), R_{wNT} = 온도보정계수, K_{nit} = 질산화에 대한 반포화 산소농도 (mgO_2/L), K_{NO_3} = 탈질화에 대한 반포화산소농도 (mgO_2/L), P_{NH_3} = 암모니아 선호계수이다.

(3) 인

유기성인은 WASP에서와 같이 살아있는 식물플랑크톤에 포함되어있는 유기성인 (CHLA-OP)과 죽은 유기물질에 포함된 유기성인 (NOP)으로 구분하여 모의되도록 하였다. 인은 질소의 경우와 같이 식물플랑크톤의 광합성에 의해 감소하고, 호흡 및 사멸, 분해에 의해 증가되며, 침강과 무기화, PO_4-P 의 용출에 의해 변화된다.

인의 침강은 유기성인 (NOP)의 침강과 Ca, Fe, Al 등의 광물질과 결합하여 침강하는 PO_4-P 의 침강으로 구분하여 모의하였다.

$$\frac{dCHLA-OP}{dt} = CHLA \cdot H_{PA}/1000 \quad (3-2-27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dNOP}{dt} = & DR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \cdot f_{OP} \\ & - K_{83C} \cdot K_{83T}^{T-20} \cdot NOP \cdot \\ & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} \\ & - \frac{V_{NOP}}{D} \cdot NOP \end{aligned} \quad (3-2-28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dPO_4}{dt} = & - GR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \\ & + DR \cdot (CHLA \cdot H_{PA}/1000) \cdot (1 - f_{OP}) \\ & + K_{83C} \cdot K_{83C}^{T-20} \cdot NOP \cdot \\ & \frac{(CHLA \cdot H_{CA}/1000)}{K_{MPHYT} + (CHLA \cdot H_{CA}/1000)} \\ & - \frac{V_{PO_4}}{D} \cdot PO_4 + \frac{R_{wP}}{D} \cdot R_{wPT}^{(t-20)} \end{aligned} \quad (3-2-29)$$

여기서, H_{PA} = 식물플랑크톤 세포내의 P 성분비율 (mgP/mgChl-a), f_{OP} = 식물플랑크톤의 사멸 및 분해로 인해 발생하는 T-P에 대한 OP의 비율, K_{83C} = NOP의 분해계수 (1/d), $K_{83T} = K_{83C}$ 의 온도 보정계수, V_{NOP} = NOP의 침강속도 (m/d), $V_{PO_4} = PO_4-P$ 의 침강속도 (m/d), $R_{wP} = PO_4-P$ 의 용출계수 ($mgP/m^2/d$), $R_{wPT} = R_{wP}$ 의 온도보정계수이다.

5.2. BATHTUB

BATHTUB 모델은 수체의 부영양화상태를 영양물질수지 (nutrient mass balance)와 조류의 반응을 설명하는 방정식을 이용하여 유입된 영양물질에 대한 수체수질의 반응을 예측한

다 (Walker, 1996). 이 모형은 정상상태모형으로 유입량과 유출량의 차이의 변화가 작은 경우에 보다 정확한 모의결과를 제공할 수 있으며, 수체내에서 발생하는 영양물질 순환의 동역학적 과정을 구체적으로 묘사하기 보다는 수체수질상태의 전체적인 평균적인 값 (계절 또는 연평균)을 예측하기 위해 개발되었다. BATHTUB 는 수체로 유입되는 지류의 수량과 수질 (영양물질) 및 수체의 특징 등의 입력자료로 토대로 수체의 영양물질농도를 추정하고, 이를 엽록소 (chlorophyll a)의 농도 및 탁도 (turbidity)와 관련지어 수체의 부영양화 상태를 예측한다. 구체적으로 수체의 특징에 대한 입력자료로 수표면적 (surface area), 평균수심 (mean depth), 평균길이 (mean length) 및 , 혼합깊이 (mixing depth) 등이 있다. 수체의 수질에 대한 관측치가 있는 경우, PROFILE 이라는 보조 모형을 이용하여 수질의 공간분포를 모의하고, 모의 결과에 따라 수체를 분할 (segmentation)하여 각 부분 (segment)별로 수질을 모의할 수 있다.

BATHTUB 모형은 수체의 물질수지를 계산하기 위해서 이용하는데 식 (3-2-30)과 같은 연속방정식을 이용한다. 식의 각 항들은 입력자료로 부터 바로 산정되거나 경험식을 이용하여 계산된다.

$$NetAccumulation = Inflows - Outflows - NetLoss (decay) \quad (3-2-30)$$

Inflow는 상류유역으로부터의 유입량, 이류 (advective)와 확산 (diffusive)에 의한 증가량 및 질소의 대기침적 (atmospheric deposition or precipitation)의 합이되고, Outflow는 수체로부터의 유출량, 이류와 확산과정에 의한 감소량 및 증발량 (evaporation)의 합이된다. 앞서 언급한 바와 같이 BATHTUB 모형은 물질순환의 정상상태를 가정하기 때문에, 각 계산 시간간격 (calculation time interval)에서 Net Accumulation은 없는 것으로 모의한다. 한편, 이류는 수체를 복수의 부분으로 분할하였을때 부분들 사이에서 발생하는 물질의 이동과정을 뜻하는데, 부분들 사이의 물질수지방정식을 이용하여 계산된다. 확산은 수체수질의 공간적인 분포를 고려할 때만 적용되는 물질이동 과정으로 BATHTUB 모형은 이를 계산하기 위해서 5 가지 다른 경험식을 제공한다. BATHTUB 모형에서 영양물질의 퇴적 (nutrient sedimentation)은 다음과 같은 이차감쇠모형 (second-order decay)을 나타내는 식 (3-2-31)을 이용하여 계산된다.

$$W_s = K_2 \cdot C^2 \quad (3-2-31)$$

여기서, W_s 는 영양물질 퇴적량 ($mg/m^3/year$), K_2 는 유효이차감쇠비 (effective second-order decay rate, $m^3/mg/year$), 그리고 C 는 수체의 영양물질 농도(mg/m^3)가 된다. BATHTUB 모형은 이차감쇠모형이외에도 질소와 인의 퇴적량을 계산하기위한 다양한 식을 선택할 수 있게 하고 있다.

혼합기간(averaging period)는 유량 및 물질수지방정식이 계산되는 시간간격 (time interval)을 뜻하는데, 모의결과에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서, 혼합기간은 영양물질의 체류시간 (mass residence time)을 나타내는 식 (3-2-32)와 영양물질전도율

(nutrient turnover ratio)을 나타내는 식 (3-2-33)을 고려하여 선택되어야 한다.

$$\text{Mass Residence Time (years)} = \frac{\text{Nutrient Mass In Reservoir (kg)}}{\text{External Nutrient Loading (kg/year)}} \quad (3-2-32)$$

$$\text{Nutrient Turnover Ratio} = \frac{\text{Length of Averaging Period for Mass Balance (year)}}{\text{Mass Residence Time (year)}} \quad (3-2-33)$$

영양물질전도율은 수체의 영양물질이 표수층과 심수층사이의 수온차이와 그에 따른 밀도의 차이로 전도 (turnover 또는 averaging)되는데 걸리는 시간을 영양물질의 체류시간의 비로 표현한 것으로 매년 봄과 가을에 전도가 일어나는 것이 일반적이기 때문에 그 값이 보통 2.0 보다 같거나 크다. BATHTUB 모형은 이 전도과정을 통해 수체 내 수질이 급격히 변화하면서 평균화 된다는 가정을 하고 있기 때문에, 이 영양물질전도율이 너무 작으면 모의된 수체의 영양물질농도에 초기조건에 따라 크게 달라지게되고 연간변화가 작아지기는 문제가 생긴다. 반면, 영양물질전도율이 너무 크면 모의된 계절별 또는 월별 수질변화가 크게 모의되게 된다. BATHTUB 모형의 개발의 근거가 되었던 실측자료에 따르면, 영양물질 체류시간 (mass residence time)은 대략 2 개월과 6 개월 사이인 것으로 나타났으며, 영양물질전도율을 2 로 가정하고 역산하면 혼합시간은 약 4 개월에서 1 년 정도가 된다. 따라서, BATHTUB 모형은 수체의 계절별 유량 및 물질수지를 계산하는데 무난하게 적용될 수 있다.

5.3. EUTROMOD

EUTROMOD 모형은 수체 배수면적으로부터 유입되는 영양물질 부하량을 계산하고 수체에 존재하는 영양물질의 양과 농도를 계산한 다음 수체의 부영양화 정도를 판단하기 위해 개발된 모형이다 (Reckhow et al., 1992). EUTROMOD 에서 영양물질의 부하량은 앞서 설명한 EPA Screening Procedures 와 유사한 방식으로 계산되며, 수체내에서의 영양물질 변화는 물질수지방정식인 식 (3-2-34)와 일차반응식 (first-order reaction equation)인 식 (3-2-35)를 이용하여 묘사된다.

$$\text{Mass Accumulation} = \text{Inputs} - \text{Outputs} \pm \text{Reactions} \quad (3-2-34)$$

$$V \frac{dP}{dt} = M - Q \cdot P - k \cdot P \cdot V \quad (3-2-35)$$

여기서 V 는 수체의 부피 (m^3), P 는 수체의 총인 농도, M 은 연간 인유입량 ($g/year$), Q 는 연강 홍수유입량 ($m^3/year$), k 는 일차반응계수 ($year^{-1}$)이다. EUTROMOD 모형 또한 수체영양물질변화가 정상상태에서 일어나는 것으로 가정하기 때문에 식 (3-2-36)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$P = \frac{M}{Q + k \cdot V} = \frac{P_{in}}{1 + k \cdot \tau_w} \quad (3-2-36)$$

여기서, P_{in} 은 유입되는 인의 평균농도 (mg/L), τ_w 는 수리학적 체류시간 (year)이다. 이 식은 수체내 영양물질의 연 평균농도를 추정하기 위해서 사용되는 식으로 수체내에서 영양물질의 공간변화를 무시한다. 식 (3-2-36)에서 우변에 있는 항들은 입력자료 및 기존에 구축된 정보들로부터 추정되어야 하는데, P_{in} 과 τ_w 는 미국 전지역에 대해 구축되어 있는 자료를 이용할 수 있고, k 는 여러 수체에 대한 자료들로부터 회귀식을 구하여 추정되어야 한다. 이 계수는 유사포착효율 (sediment trapping efficiency)로도 불리며, 수체의 평균깊이, 수리학적 체류시간 및 유입 인(또는 질소)의 농도의 함수로 알려져 있다. 이러한 과정을 통하여 수체로 유입되는 영양물질의 양과 수체의 영양물질 농도가 계산되면 이를 바탕으로 수체의 부영양화 상태를 판단하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, EUTROMOD 모형은 수체에 유입되는 오염물질의 부하량도 계산하는데 (EPA Screening Procedures 와 유사한 방식), 이때 유사 및 영양물질 유입량을 결정하는 중요한 인자인 유사전달율을 유역의 각 부분으로부터 수체까지의 수리학적 거리에 따른 함수로 정의하고 이를 계산하기 위해서 경험식인 식 (3-2-37)을 사용한다.

$$\ln(S_R) = 1.91 - .034 \ln(d) \quad (3-2-37)$$

여기서, d 는 부하량 산정대상 지역의 중심으로부터 수체까지의 흐름방향에 따른 거리이며, 유역전체에 일괄적으로 적용할 경우 주하천길이 (main stream length)의 반으로 정의된다. 이와 달리, Williams (1977)는 유사전달율을 여러 유역의 특징의 함수로 정의하고 경험식으로 식 (3-2-38)을 다음과 같이 제안한바 있다.

$$S_R = 1.336 \times 10^{-11} (DA)^{-0.0998} (ZL)^{0.3629} CN^{5.444} \quad (3-2-38)$$

여기서, DA 는 유역면적 (km^2), ZL 은 기복량비 (m/km), CN 은 유역의 평균 유출곡선번호 (Curve Number)이다. 유사전달율을 계산하기 위해서 많은 식이 제안되었으나 대부분 특정 지역의 관측자료에 기반한 경험식이기 때문에 어느 유역에도 적용할 수 있는 보편적인 유사전달율 계산식은 아직까지 제시되지 않고 있다 (Haan et al., 1994). 하지만, 실무에서는 적용유역의 특성이 식이 개발된 유역의 그것과 유사한 경우 차용하여 쓰기도 하며, 가능한 경우 보정하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다. EUTROMOD 모형은 BATHTUB 모형과 달리 수체를 여러 부분으로 분할 할 수 없어, 작은 수체에 적용되기 적합하다. 또한, EUTROMOD 모형은 수체로 유입되는 영양물질의 유입량을 모의할 수 있어 다른 유역부하량 모형을 이용할 필요가 없다. 모형의 매개변수에 대한 자료가 잘 구축되어 있어 미국내

지역에 사용하기 편리하며, 미국 밖 지역에서도 매개변수를 적절하게 선택할 수 있다면 충분히 적용가능할 것으로 사료된다. EUTROMOD 는 spreadsheet 모형으로 BATHTUB 모형과 달리 사용자의 특정 목적에 따라 쉽게 변형할 수 있다는 장점이 있다. 또한, EUTROMOD 는 수문학적 변동에 따른 불확실성을 고려할 수 있는 모듈이 내장되어 있어 예측결과의 불확실성을 파악하는데 도움을 줄 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 장에서는 COMFARM 기반 농업용 저수지 물순환 해석 모형을 구축하였고 수문 부분에 대해 실측자료와 비교하여 그 적용성을 평가하였고, 수질부분은 개발기법을 정립하였다. 본 장의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 농업용 저수지 물순환해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework COMFARM에 내재되어 구동되며 자료관리시스템 AWR-DMS와 연동하여 전처리를 수행하며 매개변수 최적화, 그래프 생성, 표 생성, 보고 작성 등의 후처리 과정을 제공한다.
- ② 농업용수 공급량 모의 모형을 개발하였으며, 이를 적용하여 관개효율의 연별 변화와 필요수량을 고려하여 추정된 용수 공급량이 실제 현장에서 공급되는 수량을 잘 모의하는지를 평가하였다. 대상지구로 이동저수지 지구를 선정하여, 2001~2009년 기간에 대한 실측 공급량 자료를 구축하였다. 관개효율, 물꼬 높이, 침투량 등 총 6개의 매개변수에 대해 민감도 분석, 보정 및 검정을 수행하였다.
- ③ 농업용수 공급량 매개변수 민감도 분석 결과, 관개효율이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 관개효율은 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. 통계적 지표 산정 결과 월단위에 대한 *PBIAS*, *NSE*, 그리고 *RSR* 은 보정기간 동안 각각 2.7%, 0.93, 0.26로, 검정기간 동안 각각 3.9%, 0.89, 0.32로 매우 우수하게 나타났다.
- ④ 따라서 비록 농업용수 공급량은 인위적 요소이나, 적절한 매개변수 값을 사용하여 모의한다면 모의치가 실측치와 유사하게 모의될 수 있을 것이다. 하지만 대상지구의 실측자료가 확보되지 않아 보정되지 않은 매개변수를 사용하는 경우 결과가 매우 안 좋을 수 있을 가능성이 나타났다. 따라서 농업용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수의 선정은 매우 중요할 것으로 사료되며, 특히 관개효율은 연별로 보정하는 것을 제안한다.
- ⑤ 농업용 저수지 물수지 모형을 농업용수 공급량 모형과 저수지 유입량 모형을 연계하여 개발하였으며, 홍수기 제한수위와 연단위 관개효율 변화를 고려하는 저수지 운영규칙을 개발하였다. 매개변수 민감도 분석 결과 관개효율 매개변수가 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 그리고 만수위 방류량의 변화에 가장 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- ④ 대상저수지 4개소에 대한 연단위 관개효율 변화 및 홍수기 제한수위 운영을 고려하여 보정하였으며, *NSE*, *RSR*, R^2 등의 통계 지표가 우수하게 나타났고, 산포도 및 시계열 그래

프를 통해서도 실측치와 모의치가 유사하게 나타났다. 그러나 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않는 경우와 홍수기 제한수위를 고려하지 않는 경우는 모의 결과가 실측 결과와 상당한 차이가 발생할 가능성이 나타났다.

- ⑥ 검증된 모형 및 운영규칙을 이용하여 저수지 물수지 성분을 모의하였고, 저수지의 전체 유출성분 중 약 25-52 %가 농업용수 공급량으로 44-73 %가 제한수위 및 만수위 방류량으로 유출되는 것으로 나타났다. 그리고 저수지 수면 증발에 의해 유출되는 성분은 미비한 것으로 나타났다.
- ⑦ 농업용 저수지의 수질 모의에 적용할 수 있는 수질 해석 기법을 조사 및 분석하였다. 수문 및 수질 측정 자료가 미비한 우리나라 농업용 저수지의 현실을 고려하고, 향후 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용이 용이하도록 비교적 간단하게 사용할 수 있는 ARSIM-rev, BATHTUB 및 EUTROMOD 모형의 이론적 배경을 정리하였다. 향후 각 방법의 편의성, 적용성 등을 종합적으로 분석하여 농촌용수 물순환 종합해석 모형에 적용하고자 한다.

본 연구에서 개발된 저수지 물수지 모형과 운영규칙은 한국을 포함한 여러 아시아 국가에서 유용할 것으로 사료된다. 또한, 모형은 기후변화 등 다양한 여건변화를 고려하여 저수지 운영규칙을 재수립하는데 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 농업용 저수지의 수질은 전국 농업용 저수지의 실측 수질자료가 충분하지 않은 실정으로, 복잡한 모형을 사용할 경우 입력자료 구축 과정에서 상당한 가정이 필요하게 되어 모의 결과에 신뢰성이 낮아지게 된다. 이에 비교적 간단한 방법을 사용하는 것이 우리나라의 농업용 저수지의 수질 모의에 더 효율적이라고 할 수 있다. 따라서 본 장에서 분석한 간단한 수체 수질 모의 기법은 농업용 저수지 물수지 해석 모형과 연계하여, 향후 농촌용수 물순환 종합해석 모형의 저수지의 수질 모의 부모형으로 개발될 수 있을 것으로 사료된다.

제 3 절 저수지 하류유역 물순환 해석기법의 개발 및 적용

1. 서 론

농업용 저수지의 하류유역은 농업용수를 공급받는 관개지구와 산림지, 밭 등 관개를 실시하지 않는 배후 유역이 산재하고 있다. 배후 유역은 일반적으로 U자 혹은 V자 형태로 관개지구를 인접하게 에워싸고 있거나 관개지구 주위를 완전히 포위하는 O자 형태를 이루고 있다 (임상준, 2000). 저수지 하류유역의 수문해석은 그 기작이 매우 복잡하고, 기상, 작물, 토양 등의 물리적인 요소와 농민 및 저수지 관리자의 물관리 등의 인위적인 요소가 복합적으로 작용하고 있다. 이러한 저수지 하류 유역의 하천유량은 저수지에서 방류되는 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량과 배후 유역으로부터의 횡 유입량, 관개지구에서의 배수량, 그리고 지하수 유출량 등에 따라 결정된다.

특히, 관개지구의 배수량은 유역의 물 수급 전망, 하천 유황의 예측, 농업비점오염 부하량 추정 등 유역 수자원 관리에 있어서 중요한 요소이다 (송정현 등, 2015a). 관개지구의 배수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이 등의 인위적 요소에 영향을 받고 시설재배지의 면적 등에 의해 영향을 받는다. 한편, 최근에는 고부가가치 농산물 생산에 대한 정책적 지원이 전국적으로 확대됨에 따라 시설재배지는 1986년부터 2005년까지 지속적으로 증가하는 추세이다. 시설재배지의 총면적은 2005년 기준 100,915 ha인 것으로 조사되었으며 (농림부, 2006), 시설재배지는 불투수면으로 작용하여 강우가 지하로 스며들지 못하고 배수로를 통해 일시에 하천으로 유입됨에 따라 하천수위 급상승에 기여한다 (김학관, 2009). 따라서 저수지 하류유역의 수문순환에 있어 시설재배지의 증가 또한 고려할 필요가 있다 (송정현, 2013; 송정현 등, 2013b). 또한, 관개지구는 저수지, 양수장, 취입보 등의 수리시설물을 이용하여 하천수를 저수하거나 취수하여 이용하며, 그 밖에 관정이나 집수암거 등으로부터 지하수를 채수하여 활용하고 있기 때문에 (임상준, 2000), 이러한 기작 또한 고려될 필요가 있다.

본 연구에서는 저수지 하류 하천유량을 추정하기 위해서 하류유역을 저수지, 관개지구, 그리고 배후 유역으로 구분하고, 저수지 방류량/배후유역 횡 유입량/관개지구 배수량/그리고 지하수 유출량을 모의 후 각 요소들을 홍수 추적 후 합하여 하천 유량을 모의하는 하천네트워크 기반 유량 해석 모형을 개발하고자 한다.

한편, 논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 비점오염의 배출 양상이 다양하며 부영양화의 주원인으로 보고되고 있다 (송정현 등, 2012; Chung et al., 2003). 논 비점오염은 동아시아뿐만 아니라 남미, 아프리카, 호주 등의 주요 관심분야이며 (Takeda and Fukushima, 2006), 한국에서도 하천 수질관리를 위한 주요 문제로 제기되고 있다 (Yoon et al., 2003; Chung et al., 2003; Kim et al., 2007; Her, 2014). 논 비점오염 관리를 위해서는 발생원 관리가 가장 효과적으로 알려져 있으며, 특히, 시비 효율 향상, 효율적인 물관리 등 다양한 영농방법 개선을 통한 비점오염원 발생 저감 방안 개발이 요구 되고 있다 (강문성, 2010; 송정현 등,

2012).

비점오염의 주원인은 강수에 의한 유출이기 때문에 배출부하량은 강우량에 따라 변동이 크다. 배출부하량을 정량적으로 산정하기 위해서는 장기적인 모니터링이 가장 정확하다. 하지만 논에서의 배출부하량 모니터링은 시험포장을 운영하여 장기간의 실측 자료가 뒷받침되어야 한다는 어려움이 있다. 따라서 국내외에서 모니터링 방법의 시간적, 경제적 한계를 극복하기 위하여 비점오염모형을 이용한 논에서의 배출부하량 해석을 시도하고 있다 (송정현 등, 2012).

지난 수십년간 국내외에서 많은 논 비점오염 모형이 개발되어 왔다. 국내에서는 전지홍 등 (2004)이 논에서의 시비와 바닥에서의 용출을 Dirac delta function과 Continuous source function을 이용하여 배출부하량을 모의하는 PADDIMOD모형을 개발하여 지하수관개논과 지표수 관개논에 대하여 적용성을 평가하였다. 진영민 등 (2002)과 서춘석 등(2002)은 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하여, 또한 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식을 개선하여 CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management Systems for Paddy) 모형을 개발하여 지표수 관개논에 대하여 적용성을 평가하였고, 성충현 등 (2011)은 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논에서의 수질 변화를 모의하여 배출부하량 저감 효과를 평가한 바 있다 (송정현 등, 2012). 또한, Kang et al. (2006)은 SWAT 모형에 논 물수지식을 추가하여 수계의 배출부하량을 모의하는 오염총량모의시스템을 개발하였다. 국외에서는 Chowdary et al. (2004), Tournebize et al. (2006), Antonopoulos (2010)에 의해 논에서의 수질 모형이 개발된 바 있다. 하지만 국내외에서 개발된 대부분의 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양의 수리학적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 기존의 논 비점오염 모형의 또 다른 제약조건으로는 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서 사용자 맞춤형 전·후처리 컴포넌트가 모형에 추가될 필요가 있다 (Song et al., 2015).

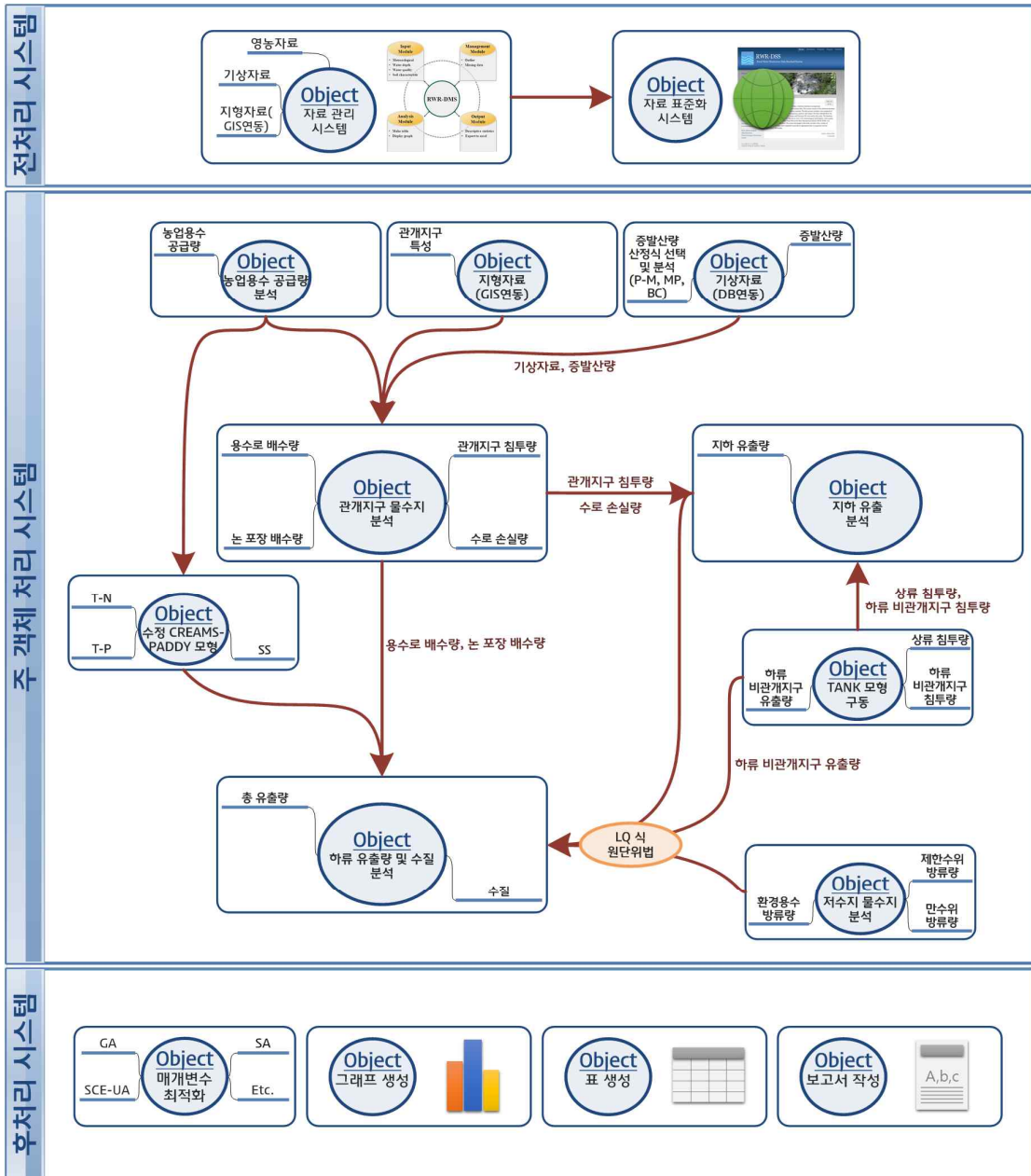
본 장에서는 ① 저수지 하류유역의 물순환을 해석하는 모형을 설계하고, ② CREAMS-PADDY 모형의 기작을 수정/개선하고 전·후처리 컴포넌트를 추가하여 논에서의 수문 및 수질을 추정하는 모형을 개발하며, ③ 논과 시설재배지로 구성되는 복합영농 관개지구의 배수량을 추정하는 모형을 개발 및 적용하고, ④ 관개지구의 회귀수량 추정 방식을 조사·정립하고 농업용수 회귀특성을 분석하며, 그리고 ⑤ 저수지 방류량, 비관개지구 유출량, 관개지구 배수량, 지하 유출량 등의 입출력 요소를 고려하여 하천네트워크 기반으로 저수지 하류 하천유량을 해석하는 모형을 개발 및 적용하고자 한다.

2. 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성

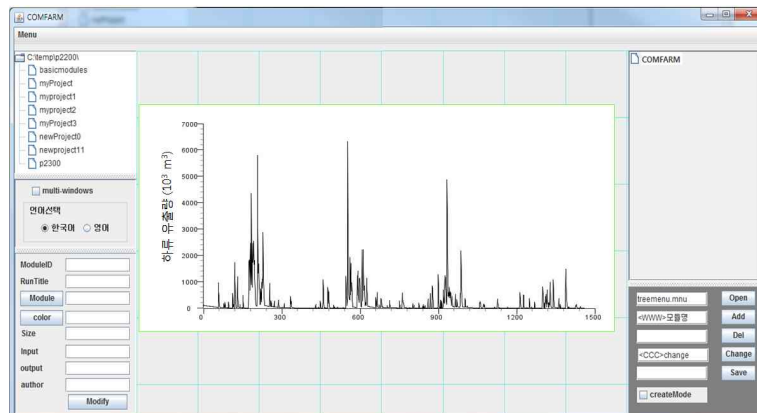
본 연구에서 개발한 저수지 하류유역 물순환 해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COMponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)에 내재되어 [제 3 장 제 1 절]의 저수

지 유입량 모형의 출력 결과인 상류유역 지하침투량과 [제 3 장 제 2 절] 저수지 물수지 해석 모형의 출력 결과인 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경요수 방류량과 연동이 되도록 개발하였다. COMFARM에 대한 자세한 설명은 [제 3 장 제 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

(그림 3-3-1)은 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성을 보여주고 있다. 모형은 COMFARM의 전처리 시스템인 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 데이터베이스에서 제공하는 시간·공간·영농자료를 통해 입력 자료를 쉽게 구축할 수 있다. AWR-DMS에 관한 자세한 설명은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다. 모형의 주 객체 처리 시스템에서는 저수지 하류유역의 수문 및 수질을 해석하기 위한 요소기술이 내재되어 있다. 저수지 하류유역은 저수지 관개지구와 비관개지구 (배후유역)로 구분되며 관개지구는 용배수로, 시설채배지, 그리고 논으로 구성되어 있다. 논에서의 수문 및 수질 모의 기작은 본 연구에서 개발한 수정 CREAMS-PADDY 모형으로부터 모의된다. 논에서의 포장 배수량 추정은 물수지식을 기반으로 모의되며 증발산량 성분은 Penman-Monteith 식, 수정 Penman 식, Blaney-Criddle 식 중 사용자가 선택하여 이용할 수 있고, 침투량 성분은 사용자가 직접 입력하거나 Darcy's law 등을 이용하여 모의할 수 있도록 구축되어 있다. 수질 성분은 USLE식과 영양물질 수지 방정식을 통해 모의되며 출력결과인 포장 배수량, 영양물질 배출부하량 등은 하류유역 물순환 해석 모형으로 입력되어 유역단위로 계산이 이루어진다. 하류유역 중 관개지구는 CREAMS-PADDY 모형에서 모의된 포장 배수량뿐만 아니라 용수로 배수량과 송수손실량도 모의된다. 용수로 배수량은 [제 3 장 제 2 절]에서 개발된 농업용수 공급량 모형으로 출력 결과로부터 입력받아 배분관리용수율을 고려하여 모의된다. 비관개지구는 [제 3 장 제 1 절]의 수정 3단 Tank 모형을 통해 모의된다. 지하수 유출량은 송수 손실량, 상류 침투량, 관개지구 침투량, 송수 손실량, 비관개지구 침투량 성분을 입력 받아 모의된다. 하류유역 유출량 모형의 최종 출력 결과인 저수지 유역 유출량은 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 관개지구 배수량, 비관개지구 유출량, 지하수 유출량 등으로부터 모의가 이루어진다. 하류유역의 배출부하량은 수정 CREAMS-PADDY 모형의 모의 결과인 논에서의 배출부하량과 비관개지구의 배출부하량으로부터 모의된다. 비관개지구의 배출부하량은 LOADEST 기반 오염부하량 추정 모형을 기반으로 모의되며, 물넘이 방류 오염부하량은 해당시기의 저수지의 수질을 고려하여 모의된다. 논에서의 물 및 물질수지 요소, 관개지구 배수량, 하류유역 하천유량에 관한 자세한 기작은 본 절에 상세히 서술되어 있다. 논을 제외한 지역의 오염부하량 모의 기작은 [제 3 장 제 1 절]에 상세히 서술되어 있다. 이상의 모의 요소와 관련된 기상 및 지형자료는 AWR-DMS와 연동된다. 그리고 출력 결과는 COMFARM의 후처리시스템을 통해 그래프, 표, 보고서 작성 컴포넌트를 통해 출력할 수 있다. 또한 매개변수 최적화 컴포넌트에서는 실측 자료를 보유하고 있는 모의 요소에 대해 매개변수의 자동 보정 및 검정을 수행할 수 있다. (그림 3-3-2)는 농업용 저수지 물순환 해석 모형의 출력 결과를 보여주고 있다.



(그림 3-3-1) COMFARM기반 저수지 하류유역 물순환 해석 모형의 구성



(그림 3-3-2) 저수지 하류유역 물순환 모형의 출력 화면

3. 논에서의 수문·수질 해석 모형의 개발 및 적용

3.1. 수정 CREAMS-PADDY 모형의 개발

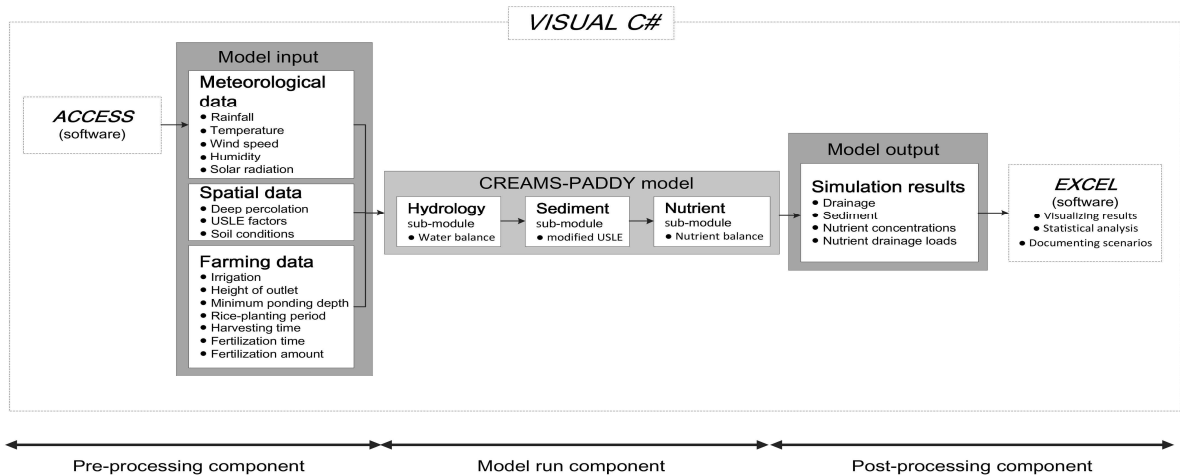
CREAMS-PADDY 모형은 포장단위 농업비점오염 모형으로 CREAMS 모형을 담수 상태인 논에서의 물수지 및 영농변화에 대처할 수 있도록 개선하고 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식을 개선하여 개발한 모형이다 (성충현 등, 2011; 송정현 등, 2012). CREAMS-PADDY 모형은 크게 수문부분, 침식부분, 영양물질부분으로 구성되어 있으며 포장 배수량, 유사량, 총질소(T-N) 및 총인(T-P)의 농도, 그리고 T-N 및 T-P 배출부하량을 구하도록 구성되어 있다. 포장배수량은 강우량, 관개량, 침투량, 물꼬 높이를 입력받아 증발산량 공식과 물수지식에 의하여 추정되고, 유사량은 수정된 USLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 공식 (Wischmeier and Smith, 1978)으로 산정한다. 논물의 농도는 시비량, 강우의 농도, 관개수의 농도, 토양의 초기 영양물질량, 시비시기, 시비효율 등을 입력받아 영양물질의 이동을 이류-확산 반응식 기반 물질수지 식으로부터 추정하도록 구성되어 있다. 배출부하량은 추정된 포장 배수량은 영양물질의 농도를 곱하여 산정하게 된다.

기존의 CREAMS-PADDY 모형은 기본적으로 CREAMS 모형의 입·출력 구조를 그대로 유지하고 있다. 이러한 이유로 CREAMS-PADDY 모형은 입력 자료를 ASCII 포맷으로 구축해야 한다. 사용자에게 의한 ASCII 포맷의 입력 자료 구축은 CREAMS 매뉴얼에서 제시되는 열과 행의 위치를 엄격히 따라야하기 때문에 사용자는 상당히 불편함을 느낄 수 있다. 만약 입력자료가 정해진 위치에서 벗어나 위치하게 되면, 모형은 구동하지 않고 에러가 발생하는데 이 때 어디서 입력 자료가 잘못 구축되어 있는지 알 수 없기 때문에 잘못된 부분을 발견하기까지 시간이 많이 소요되게 된다. 또한, 모형의 구동 후 결과 또한 ASCII 포맷으로 출력되기 때문에 사용자는 EXCELTM과 같은 추가적인 프로그램이 필요하게 된다. 게다가 CREAMS 모형은 미국에서 개발된 모형이기 때문에 US 단위로 입/출력이 이루어지고, SI 단위계를 이용하는 연구자는 단위 변환 과정을 수행해야 하기 때문에 이용하는데 있어 불편함을 느낄 수 있다. 그리고 국내외에서 개발된 대부분의 논에서의 수문·수질 모형이 그렇듯이 논토양의 물리적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 또한, 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있다 (Song et al., 2015).

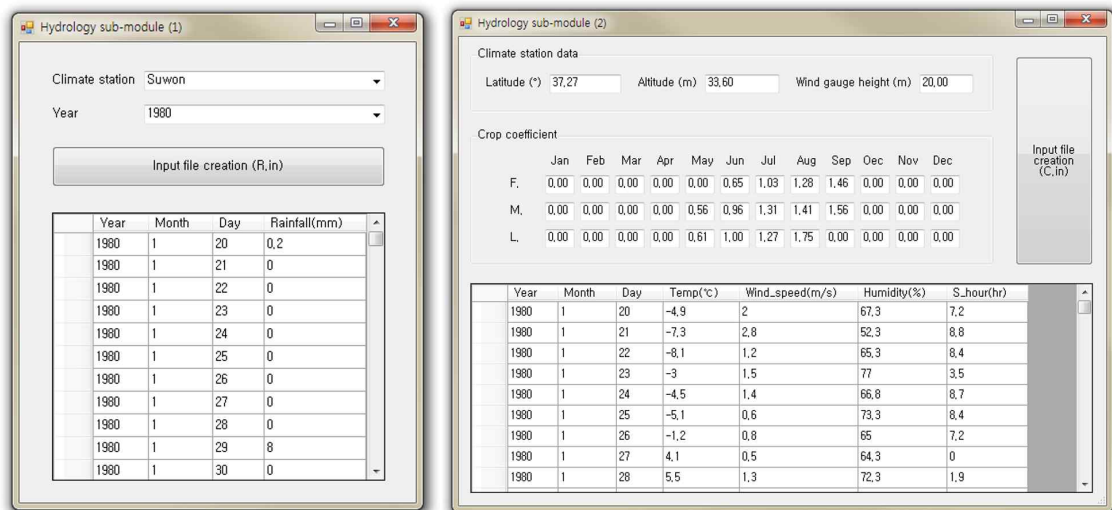
본 연구에서는 기존의 CREAMS-PADDY 모형의 기작을 수정/개선하고 전·후처리 컴포넌트를 추가하여 논에서의 수문 및 수질을 추정하는 모형을 농업유역 물순환 해석 Framework COMFARM 기반으로 개발하였다. (그림 3-3-3)은 COMFARM 기반의 수정 CREAMS-PADDY의 구조를 보여주고 있다. 기상자료는 Microsoft AccessTM과 연계되어 자동으로 구축되며, 또한 모의 결과는 엑셀 자료로 출력되어 사용자가 쉽게 해석/분석할 수 있다.

(그림 3-3-4) - (그림 3-3-6)은 전처리 컴포넌트 (pre-processing component) 화면이며, 각각 수정 CREAMS-PADDY 모형의 수문부모형, 침식부모형, 그리고 영양물질부모형의 입력자료 구축 화면을 보여주고 있다. 전처리 컴포넌트 중 수문부모형 입력 화면에서는 COMFARM의 자료관리시스템과 연동이 되며, 사용자가 기상관측소를 선택하면 강우량/기온/풍속/습도/일조시간 등의 기상자료, 위도/고도/풍속계 높이 등의

자료가 자동으로 입력 형식에 맞게 구축된다. 또한, 수문부모형/침식부모형/영양물질부 모형은 침투량, USLE 인자 등과 같은 지형관련 매개변수와 물꼬 높이, 최소담수심, 관 개시기, 수확시기, 비료시기, 비료량 등의 영농 매개변수를 입력해야 하는데 이에 대한 입력을 사용자가 GUI 환경에서 편리하게 수행할 수 있다. 또한, 지형자료 및 영농자료와 관련된 해당 매개변수가 선행연구의 입력 값이 첫 화면에 입력되어 있기 때문에 적용지역에 대한 정보 획득이 어려운 매개변수는 해당 값을 이용하면 된다. 후처리 컴포넌트 (post-processing component)에서는 수정 CREAMS-PADDY 모형의 출력 결과인 논 포장 배수량, T-N 배출부하량, T-P 배출부하량 등을 도식적으로 보여주며 매개변수 최적화 컴포넌트를 통해 관련 보정 및 검정을 자동으로 수행할 수 있다. 즉, 사용자는 기존의 CREAMS-PADDY 모형보다 입력 자료를 더 빠르게 구축할 수 있으며, 기존 CREAMS 모형의 입력 및 출력 형식에 대한 지식이 없어도 무방하다. 또한, 전처리 컴포넌트에서 SI 단위에서 US 단위로 변환하는 기작이 내재되어 있으며, SI 단위 이용자는 별도로 단위 변환을 수행할 필요가 없다.



(그림 3-3-3) 수정 CREAMS-PADDY 모형의 구성



(그림 3-3-4) 수정 CREAMS-PADDY 수문 부모형의 입력부 화면 (1)

Hydrology sub-module (4)

Irrigation start date Year 1980 Month 5 Day 20

Irrigation end date Year 1980 Month 10 Day 31

Maximum irrigation amount (mm) 150

Enter

	Year	Month	Day	Minimum ponding depth (mm)	Height of drainage outlet (mm)	Deep (mm)
	1980	5	20	120	150	5.1
	1980	5	21	40	70	5.1
	1980	6	9	40	70	2.3
	1980	6	11	40	70	2.9
	1980	6	17	40	70	2.4
	1980	6	29	40	70	2.7
	1980	7	7	3	10	2.7
	1980	7	17	40	70	2.7
	1980	8	14	40	70	2.5
	1980	8	15	40	70	2.6
	1980	8	19	40	70	2.8

Input file creation (P,in) Run Move to Erosion sub-module

(그림 3-3-4) 수정 CREAMS-PADDY 수문 부모형의 입력부 화면 (2)

Erosion sub-module

TYPE	FRACTION	SPECIFIC SURFACE (m ² /g)
CLAY	0.35	20
SILT	0.30	4
SAND	0.35	0.05
ORGANIC MATTER	0.02	1000

OVERLAND AREA (km²) 0.003003 SLOPE OF UPPER END 0.07

SLOPE LENGTH (m) 100.2 SLOPE OF MID SECTION 0.07

AVERAGE SLOPE 0.005 SLOPE OF LOWER END 0.07

USLE factors Year 1980 Month Day

C P Manning's n

Enter

	Year	Month	Day	USLE C	USLE P	Manni n
	1980	1	1	0.37	0.5	0.074
	1980	5	16	0.38	0.9	0.53
	1980	5	25	0.38	0.8	0.43
	1980	6	23	0.2	0.1	0.13
	1980	7	20	0.08	0.03	0.13

Input file creation (e,in) Run

(그림 3-3-5) 수정 CREAMS-PADDY 영양물질 부모형 입력부 화면

Nutrient sub-module

Farming parameters

Transplanting date Year 1980 Month 5 Day 24

Harvesting date Year 1980 Month 10 Day 18

Fertilization times 2

Fertilizing date Year 1980 Month Day

Fertilization amount (kg/ha) NH4-N NO3-N T-P Efficiency

Rainfall concentration (mg/L) NH4-N 0.507 NO3-N 0.01 T-P 0.05

Irrigation concentration (mg/L) NH4-N 1.44 NO3-N 1.44 T-P 0.02

Other parameters

SOLN 0.2 SOLN 0.2 NO3 50

SOILN 0.0005 SOILP 0.00018 EXKN 0.057 EXKP 0.07

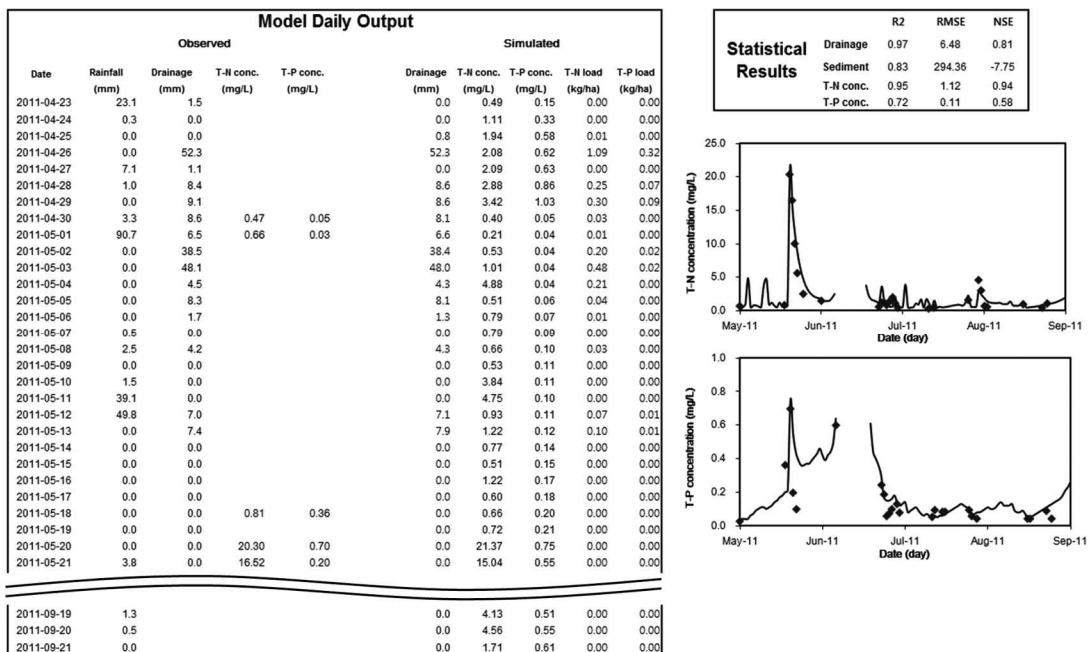
AN 7.4 BN -0.2 AP 7.4 BP -0.2

RZMAX 300.0 YP 4540.0 DMY 2.5

POTM 100.0 DOM 73.0 SD 30.0 PU 250.0

(그림 3-3-6) 수정 CREAMS-PADDY 침식 부모형 입력부 화면

(그림 3-3-7)은 본 연구에서 개발한 후처리 프로그램을 보여주고 있다. 모의 결과는 엑셀 파일로 바로 출력이 이루어진다.



(그림 3-3-7) 수정 CREAMS-PADDY 모형의 EXCEL™ 기반 출력 화면

해당 엑셀 파일에서는 배수량, T-N 및 T-P 논담수 농도, 그리고 T-N 및 T-P 배출부하량에 대한 일별 모의치를 쉽게 확인할 수 있으며, 해당 모의요소는 저절로 시계열 그래프로 도시되도록 구성되어 있다. 또한, 사용자가 실측 자료를 해당 엑셀 파일에 입력하면 NSE (Nash and Sutcliffe Efficiency)(Nash and Sutcliffe, 1970), R^2 , RMSE와 같은 통계 지표가 저절로 계산되도록 구성되어 있다. 따라서, 사용자는 기존과 같이 ASCII 포맷으로 출력된 모의 결과를 후처리 프로그램을 이용하여 직접 그리거나, 통계 지표 계산을 위한 식을 구성할 필요가 없다.

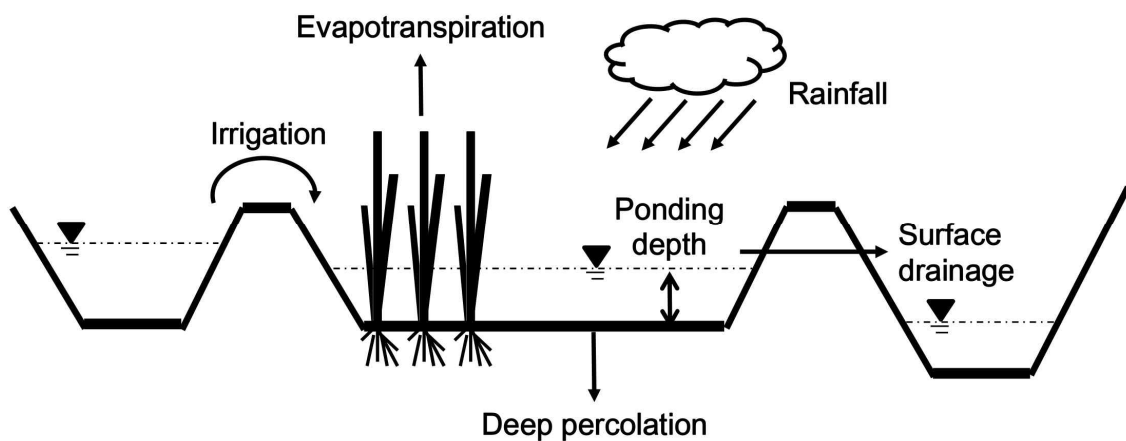
이상과 같이 전처리 및 후처리 컴포넌트를 통해 사용자는 더 편리하게 논 비점오염 모델링을 수행할 수 있다. 즉, 보정 및 검정을 더 쉽고 빠르게 수행할 수 있고, 물 및 시비관리 시나리오 적용에 따른 배출부하량 저감 효과 분석 등을 더 편하게 수행할 수 있다.

가. 수문 부모형

담수심은 (그림 3-3-8)과 같이 논에서의 물수지로부터 계산된다. 논에서의 물수지는 관개량, 강수량, 증발산량, 침투량, 포장 배수량 등으로 구성되며, 담수심은 식 (3-3-1)로부터 계산된다.

$$ST_t = ST_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (3-3-1)$$

여기서, IR 은 관개량 (mm), $RAIN$ 은 강수량 (mm), INF 는 침투량 (mm), ET 는 증발산량 (mm), DR_t 은 t일의 논 포장 배수량 (mm), 그리고 ST_t 는 t일의 담수심 (mm)이다.



(그림 3-3-8) 논에서의 물수지

논 포장 배수량은 논에 공급되는 관개량과 강수량이 물꼬를 넘어 배수로나 하천으로 지표 율류하는 양이다. 포장 배수량을 모의하는 방법은 일별 담수심과 물꼬높이의 차가 당일의 전량 배수되도록 모의하는 방법과 광정위어 (broad-crest weir) 공식으로 모

의하는 방법 등이 있다. 광정위어 공식은 물꼬의 폭과 같은 물리적 변수를 이용하여 상당히 정확하게 모의할 수 있으나 시간별 강우량 자료를 필요로 하는 특징이 있다. 논 광역 배수량 모형은 강우량 자료가 일별로 입력되도록 구성되어 있으며, 식 (3-3-2)와 같이 배수량은 담수심과 물꼬높이의 차로부터 모의한다.

$$DR_t = ST_t - CH, \quad ST > CH \quad (3-3-2)$$

$$DR_t = 0.0, \quad ST \leq CH$$

여기서, CH 는 물꼬 높이 (mm)이다.

(1) 관개량

농업용수 공급량 중 관개량은 용수로 배수량 (delivery management water requirement)과 송수 손실 수량 (canal conveyance loss)을 제외한 양으로 식 (3-3-3)으로 구할 수 있다. 농업용수 공급량은 저수지 물수지 모형에서의 모의된 값을 입력받는다.

$$IR_t = WU_t - CL_t - ICD_t \quad (3-3-3)$$

여기서, IR 은 관개량 (mm), WU 는 농업용수 공급량 (mm), CL 은 송수 손실 수량 (mm), ICD 은 용수로 배수량 (mm)이다.

송수 손실 수량은 수원으로부터 말단포장까지 용수를 송수하는 과정에서 증발산 및 수로로부터의 침투에 의하여 손실되는 수량이다. ‘농업생산기반정비사업 계획설계기준 관개편’에서는 토공수로의 경우 송수 손실률은 간선용수로의 경우 15~25%, 지선용수로의 경우 10~20%, 용수지거의 경우 10%, 콘크리트 및 아스팔트수로의 경우 5~7%를 추천하고 있다. 이용직 등 (2008)의 현장 조사 결과에 의하면, 콘크리트 수로에서의 송수 손실률은 평균 5.7%, 토공수로의 간선은 11.7%, 지선은 20.1%로 보고하고 있다.

(2) 증발산량

논벼의 증발산량은 시기별 작물계수와 Penman-monteith 공식, 수정 Penman 공식, Blaney-Criddle 공식 중 선택하여 산정된 잠재증발산량으로부터 식 (3-3-4)와 같이 구하였다.

$$ET_t = K_c \cdot PET \quad (3-3-4)$$

여기서, ET 는 논벼의 증발산량 (mm), K_c 는 논벼의 작물계수이며, PET 는 잠재증발산량 (mm)이다.

작물계수 Penman-montith 공식의 경우 K_c 는 유승환 (2006)이 전국 9개 지역에 대

해 산정한 자료를 이용할 수 있으며, 사용자가 별도로 입력하고자 하는 경우 (그림 3-3-4)와 같은 화면에서 입력할 수 있다.

(3) 침투량

논에서의 침투량은 강우 또는 관개에 의해 공급된 물이 토양속으로 스며드는 양이다. 침투량은 논 토양조건이나 토층 구조, 담수심, 경지의 고저차, 지하수위에 따라 큰 차이가 있으므로, 실측에 의해 구하는 것이 일반적이다 (임상준, 2000; 강문성, 2002). 침투는 횡침투와 강하침투로 구성된다. 횡침투는 상류논으로부터 들어오는 수량, 하류논으로 나가는 수량, 용수로로부터 들어오는 수량, 배수로로 나가는 수량 등이 있다 (정하우, 2006). 횡침투량은 상류논과 하류논으로부터의 크기가 서로 비슷하며, 최근에는 용수호가 라이닝 되는 경우가 많아 유입되는 수량이 소량이며, 논두렁을 비닐로 멀칭하여 배수로로 나가는 수량이 미비하기 때문에 본 연구에서는 횡침투량을 무시하였다. 일반적으로 토양의 종류별 침투량은 <표 3-3-1>과 같다. 모형에서는 Darcy's law를 이용하여 침투량을 모의하거나 사용자가 일평균 침투량을 입력하도록 구성되어 있다.

<표 3-3-1> 토양별 침투량 (Im et al., 2000)

	Loam	Sandy clay loam	Silt clay loam	Sandy loam
Infiltration rate (mm/day)	2.7	8.8	5.6	2.2

(4) 물꼬높이

논벼는 밭 작물과 달리 시기별로 담수심을 유지하도록 물꼬를 관리한다. 물꼬높이는 영농방식에 따라 관리되고 있는 요소로, 배수량 및 유효우량을 결정하는 주요 인자이다 (임상준, 2000). 물꼬높이는 인위적 물관리 요소로 중간낙수 시기에 물꼬의 높이를 낮춰 담수된 수량이 배수되도록 구성해야 한다. 물꼬는 월별 또는 순별로 다른 경우가 있으며, 본 연구에서는 시기별 물꼬 높이를 입력할 수 있도록 구성하였다.

나. 토양유실 부모형

CREAMS-PAADY 모형에서는 토양유실 모의를 위해 CREAMS 모형의 침식 부모형을 이용하고 있다. CREAMS 모형에서는 Overland flow, channel flow, impoundment elements 등이 포장의 주요 구성요소가 되며, 이들의 결합에 따라 6개의 sequence로 나누어 토양유실 과정을 모의한다. 논 토양의 경우 위 세 가지 구성요소를 복합적으로 포함하고 있으므로, sequence를 확정하기가 힘들다 (서춘석, 2002). 따라서, 가장 간단한 sequence인 overland erosion으로 간주한 후 구성하였다. 이 경우 모형에 사용되는 변수인 LS factor 와 작물변수인 C factor, 침식보전 변수인 P factor를 논 토양의 환경에 맞게 조정할 필요가 있다 (서춘석, 2002). 지형인자인 LS factor는 CREAMS-PADDY 모형에서 논 토양의 경우 경사도 물꼬 주위를 제외하고는 경사가 매우

낮은 점을 고려하여 0.001을 추천하고 있다. C factor는 Wischmeier and Smith (1978)가 “grains in disked residues” 조건에 대해 제시한 값을 이용하였다. 침식조절방법인자인 P factor는 논에 경사가 낮고 논둑이 있는 점을 고려해야 한다. 본 모형에서는 0.1을 추천하며, 이앙 전 물 로터리와 씨레질 시기는 유출시 고농도의 토사가 유출될 수 있으므로 P값을 0.5로 추천하고 있다. Manning의 n 값은 벼가 담수상태에서는 0.13으로 조사되었으며 (박은진, 1999), 비영농기에서는 휴경상태로 간주하여 0.074를 사용한다. <표 3-3-2>는 수정 CREAMS-PADDY 모형에서 논에 대해 적용되는 시기별 C, P값과 조도계수의 값을 정리하여 보여주고 있다.

<표 3-3-2> Changes of USLE C, P factor and Manning's n

Julian date	0	130	140	180	200	220	240	280
C	0.30	0.38	0.38	0.23	0.11	0.07	0.04	0.30
P	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
n	0.074	0.13	0.13	0.13	0.13	0.20	0.20	0.074

다. 영양물질 부모형

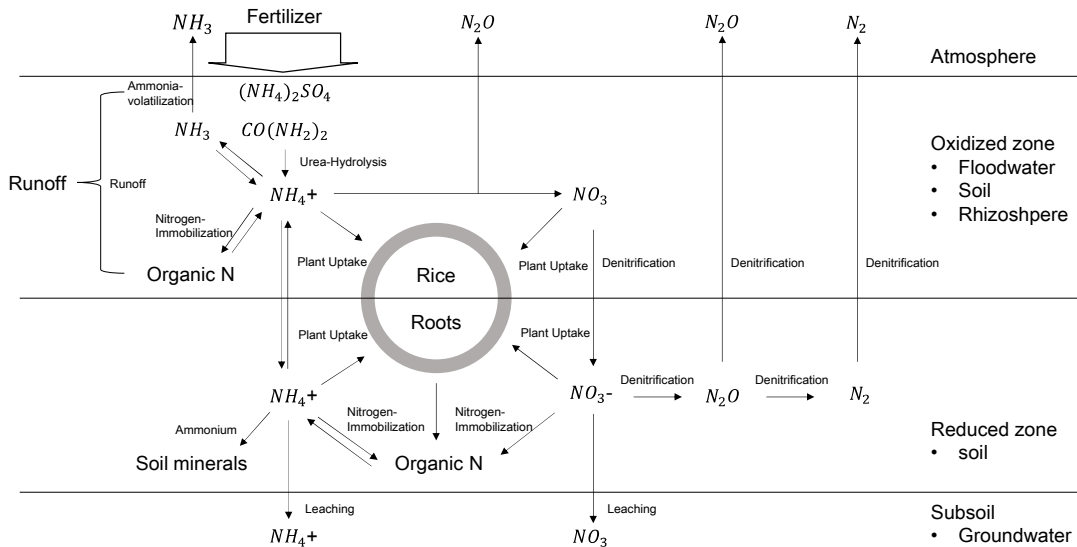
논에서의 영양물질의 이동 및 반응은 산화층과 환원층으로 구분할 수 있다. (그림 3-3-9)는 논에서의 산화층과 환원층의 반응기작을 보여주고 있다. 산화층은 담수와 토양표층 1cm로 가정하였으며, 논에서의 유출에 의한 영양물질의 유실은 산화층의 농도에 따라 결정되는 것으로 가정하였다. 영양물질의 형태는 질소의 경우 산화와 환원층에서의 반응양상이 다르므로 암모니아태 질소와 질산태 질소, 유기태 질소 등으로 구분하여 반응식을 구성하였다.

논에서의 질소의 유출입은 강우와 관개수에 용해되어 유입되거나, 비료 및 유기물 형태로 투입되어 침투, 탈질, 휘산, 작물 흡수 등으로 소비되며, 담수에 용해되어 용해상태로 유출과 함께 흘러 나가거나, 유출 토사에 흡착되어 유실된다.

토양내 질소 등의 영양물질의 이동기작을 해석하는 방법으로는 이류-확산 반응식 (adjective-dispersive-reaction equation)을 이용한 수치적 해석이 이용되어져 왔다. 대부분의 연구에서는 질산태 질소는 유동성이 크며, 암모니아태 질소는 흡착 등으로 유출에 의한 손실이 적다고 가정하고 식 (3-3-5)와 같은 이류-확산식을 간단한 물질수지식을 이용하여 표현하였다.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta D \frac{\partial C}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial z} (qC) + \Delta \quad (3-3-5)$$

여기서 θ 는 토양수분 함량 ($m^3 \text{ water}/m^3 \text{ soil}$), C는 영양물질 농도 (g/m^3), S는 흡착량 (mg/kg), D는 확산계수 (m^2/day), q는 깊이방향의 유속 (m/day), Δ 는 영양물질의 공급 및 유출 ($g/m^2/day$)이다. 식 (3-3-5)를 물질수지식으로 간단히 정리하여 <표 3-3-3>과 같으며 산화층과 환원층에 대하여 식을 구성하였다.



(그림 3-3-9) 산화층 및 환원층에서의 반응 및 이동

<표 3-3-3> 수정 CREAMS-PADDY 모형에서의 물질수지 방정식

Layer	Component	Balance equation
Oxidized zone	NH_4-N	$SOLNH_t = SOLH_{t-1} + FERNH_t + RAINNH_t + IRRINH_t - RNIT_t - VOLT_t - DWNH_t - RONH_t - SEDN_t$
	NO_3-N	$SOLNO_t = SOLNO_{t-1} + FERNO_t + RAINNO_t + IRRINO_t + RNIT_t - DNT_t - DWNO_t - RONO_t$
	ORG-N	$SOLORN_t = SOLORN_{t-1} + FERORN_t + RAINORN_t + IRRIORN_t - DWORN_t - ROOORN_t$
Reduced zone	T-P	$SOLP_t = SOLP_{t-1} + FERP_t + RAINP_t + IRRIP_t - DWP_t - ROP_t - SEDP_t$
	NH_4-N	$AMMO_t = AMMO_{t-1} + FERNH_2_t + DWNH_t + MINEL_t + FIXN_t - RNIT_2_t - UPNH_t - PERNH_t$
	NO_3-N	$NOX_t = NOX_{t-1} + FERNO_2_t + DWNO_t + RNIT_2_t - DNT_2_t - UPNO_t - PERNO_t$
	ORG-N	$RORGN_t = RORGN_{t-1} + DWORN_t + DECAY_t - MINEL_t - PERORGN_t$
	T-P	$PO_4_t = PO_4_{t-1} + FERP_2_t + DWP_t - UPPO_4_t - PERP_t$
Remark		
<p>FER : fertilization, $RAIN$: from rainfall, $IRRI$: from irrigation, DW : deep percolation, RO : runoff, SED : sediment bounded runoff, UP : uptake, FER : leaching, $SOLNH$ = ammonium, $SOLNO$ = nitrate, $SOLORN$ = organic-N, $SOLP$ = phosphorus, RNT = nitrification, $VOLT$ = volatilization, DNT = denitrification, $FIXN$ = fixation, $AMMO$ = ammonium, NOX = nitrate, RNT_2 = nitrification, $RORGN$ = organic-N, PO_4 = phosphorus, $MINEL$ = mineralization, DNT_2 = denitrification, $DECAY$ = decay, $MINEL$ = mineralization</p>		

흡착의 경우는 암모니아태 질소 및 인산에 대하여 적용되며, 질산태 질소의 경우는 흡착력이 매우 작으므로 흡착은 무시한다. Δ 는 영양물질의 형태 및 위치에 따라 달라지게 된다. 자세한 내용은 다음과 같다.

(1) 산화층에서의 반응 및 이동

산화층에서는 관개수 및 강우에 의하여 유입되거나 시비로부터 투입되어 암모니아회산을 통해 외기로 방출되며, 질산화를 통하여 질산태 질소로 변환되어 침투와 유출이 발생하게 된다. 암모니아태 질소의 물질수지식은 식 (3-3-6)과 같이 구성할 수 있다.

$$SOLNH_t = SOLNH_{t-1} + FERNH_t + RAINNH_t + IRRINH_t - RNIT_t - VOLT_t - DWNH_t - RONH_t - SEDN_t \quad (3-3-6)$$

여기서, SOLNO는 산화층에서의 질산태 질소의 양 (kg/ha), FERNO는 질산태 질소 형태의 시비량 (kg/ha), RAINNO는 강우로부터의 질산태 질소 유입량 (kg/ha), IRRINO는 관개수로부터의 질산태 질소 유입량 (kg/ha), RNIT는 암모니아태 질소의 질산화량 (kg/ha), DNIT는 질산태 질소의 탈질량 (kg/ha), DWNO는 질소 침투량, RONO는 유출수에 의한 손실량 (kg/ha)이다.

유기태 질소는 식 (3-3-7)과 같이 표현이 가능하다.

$$SOLORN_t = SOLORN_{t-1} + FERORN_t + RAINORN_t + IRRIORN_t - DWORN_t - ROORN_t \quad (3-3-7)$$

여기서, SOLORN은 산화층에서의 유기태 질소의 량 (kg/ha), FERORN는 유기태 질소 시비량 (kg/ha), RAINORN은 강우로부터의 유기태 질소 유입량 (kg/ha), IRRIORN은 관개수로부터의 유기태 질소의 유입량 (kg/ha), DWNO는 유기태 질소 침투량 (kg/ha), ROORN는 유출수에 의한 손실량 (kg/ha)이다.

① 담수의 농도 및 유출과 침투

외부로부터 유입된 영양물질은 산화층에서 토양과 담수에 분리되어 존재하게 되는데 이는 물질의 흡착정도에 따라 그 양이 달라지게 된다. 암모니아태 질소의 경우는 흡착과 용해상태로 나누어 존재하게 되는데, 이는 Langmuir의 등온 흡착식에 의하여 구하였다. 용해상태의 농도를 담수농도로 간주하였다.

Langmuir 등온 흡착식에 의하면 흡착 암모니아태 질소의 양은 식 (3-3-8)과 같다.

$$S_e = \frac{K_L C_e}{1 + b C_e} \quad (3-3-8)$$

여기서, S_e 는 평형상태의 토양흡착 암모니아태 질소 농도 (mg/kg), C_e 는 평형상태의 용해상태 암모니아태 질소 농도 (g/m^3), K_L 은 Langmuir 평형 상수 ($10^{-3} m^3/kg$), b 는 흡착 에너지와 관련된 상수 (m^3/g)이다.

토양내에서의 총 암모니아태 질소의 양은 식 (3-3-9)와 같다.

$$\frac{SOLNH}{10SD_1} = S_{NH} \times \rho + C_{NH} \times \theta \quad (3-3-9)$$

여기서, SD1는 산화층에서의 두께 (m), ρ 는 토양의 건조밀도 (g/cm^3), θ 는 토양수분 함량 (cm^3/cm^3)이다.

산화층에서 외부로부터의 강우 및 관개와 시비가 있는 경우 담수는 정상상태로 가정하면 토양입자비율 및 수분함량은 식 (3-3-10), (5-11)과 같다.

$$\rho_t = \frac{10 \times \rho}{(10 + ST + RAIN + IR)} \quad (3-3-10)$$

$$\theta_t = \frac{(10\rho + ST + RAIN + IR)}{(10 + ST + RAIN + IR)} \quad (3-3-11)$$

따라서, 토양의 건조 현장 밀도와 수분함량과 총 암모니아태 질소의 농도가 주어지면, 식 (3-3-12)와 식 (3-3-13)을 연립하여 토양 중 흡착 및 용해 농도를 알 수 있다.

물질의 유출 및 침투에 의한 이동량(kg/ha)은 다음과 같다.

$$RONH = C_{NH} \times DR \times 0.01 \quad (3-3-12)$$

$$DWNH = C_{NH} \times INF \times 0.01 \quad (3-3-13)$$

② 유사에 의한 유출

유사에 의한 유출은 식 (3-3-14) 및 식 (3-3-15)를 따른다.

$$ERN = a \times SED^b \quad (3-3-14)$$

$$SEDN = S_e \times SED \times ERN \times 10^{-6} \quad (3-3-15)$$

여기서 SED는 토양유실량 (kg/ha)이며, ERN은 enrichment ration이며, a와 b는 계수로 a = 7.4, b = -0.2이다.

③ 질산화

논토양의 경우 산화와 환원층이 분리되어 있으므로, 암모니아태 질소의 질산화는 산화층에서 주로 이루어지게 된다.

질산화는 암모니아태 질소의 함량에 따른 1차 반응식으로 토양의 온도와 수분함량의 함수로 표현하였으며, 식 (3-3-16)과 같다.

$$RNIT = K_n \times SOLNH \times f_n(\theta) \times g_n(T) \quad (3-3-16)$$

$f_n(\theta)$ 와 $g_n(T)$ 는 수분함량과 온도의 함수로 식 (3-3-17) 및 식 (3-3-18)과 같다.

$$f_n(\theta) = \begin{cases} \theta / \theta_{fc} & \text{if } \theta < \theta_{fc} \\ \theta_{fc} / \theta & \text{if } \theta \geq \theta_{fc} \end{cases} \quad (3-3-17)$$

$$g_n(T) = 1.071^{(T-35)} \quad (3-3-18)$$

여기서, θ_{fc} 는 포장용수량에서의 수분함량이다. K_n 은 토양에 따른 질산화계수가 된다.

④ 암모니아 휘산

암모니아 휘산은 질소의 중요 손실원으로 연구되어 왔으며, 여러 방면의 연구가 이루어져 왔다. 암모니아 휘산은 생물학적, 화학적, 물리적 영향을 받는 복잡한 반응이다.

휘산은 근본적으로 광물화, 질산화, 시비 등으로부터 유도되는 NH_4^+ 의 농도에 영향을 받는다. 흡착과 용해상태의 암모니아태 질소는 토양조직과 유기물함량, 탄소 교환능과 기타 이온의 농도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 토양의 pH는 용해 암모늄이온과 용해 암모니아의 분포에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 높은 pH 상태에서는 암모니아의 양이 많게 된다.

온도는 암모니아 휘산의 여러 과정에서 영향을 주는 것으로 알려져 있으며 암모니아 이온의 용해도와 휘산에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

토양중의 용해 암모늄이온(NH_4^+)은 식 (3-3-19) 및 식 (3-3-20)에 의하여 암모니아(NH_3)로 변환되며, 이는 전자의 교환으로 이루어지는 반응으로 pH에 영향을 받는 반응이다.



$$\frac{[NH_3][H^+]}{[NH_4^+]} = K_a \quad (3-3-20)$$

위 식을 대수식으로 변환하면 식 (3-3-21)과 같다.

$$\log\left(\frac{[NH_3]}{[NH_4^+]}\right) = \log\left(\frac{C_{sa}}{C_{NH}}\right) = pH - pK_a \quad (3-3-21)$$

따라서, 용해된 암모니아의 농도(C_{sa})는 식 (3-3-22)와 같다.

$$C_{sa} = 10^{pH - pK} \times C_s \quad (3-3-22)$$

암모늄 이온에 대하여 pK는 20°C에서 9.4로 알려져 있다.

용해된 암모니아의 대기로의 방출은 대기중 암모니아 가스가 존재하지 않는다고 가정하여 확산계수로 표현할 수 있다. 따라서, 용해 암모니아의 휘산은 1차 반응식으로 표현이 가능하며, 식 (3-3-23)과 같다.

$$R_v = -D_A \frac{dc}{dx} = -D_A \frac{C_g - C_{sa}}{x} = D_A \frac{C_{sa}}{x} \quad (3-3-23)$$

여기서, R_v 는 암모니아 휘산율 ($\text{g/m}^2/\text{day}$), DA 는 확산계수, C_g 는 대기중 NH_3 농도 (g/m^3), 0으로 가정, C_{sa} 는 용해 NH_3 농도 (g/m^3), x 는 대기와의 경계층의 두께 (m)이다.

위 식은 토양중의 수분함량과 온도에 관계되므로 암모니아 휘산량은 식 (3-3-24)와 같이 표현할 수 있다.

$$VOLT = \frac{DA}{x} 10^{pH - pK} \times C_s \times f_v(\theta) \times g_v(T) \times 10 \quad (3-3-24)$$

여기서, $VOLT$ 는 휘산량 (kg/ha/day), $f(\theta)$ 와 $g(T)$ 는 토양수분함량과 온도의 함수이며, 식 (3-3-25) 및 식 (3-3-26)과 같다.

$$f_v(\theta) = \theta / \theta_s \quad (3-3-25)$$

$$g_v(T) = e^{(T - 10)/10} \quad (3-3-26)$$

여기서, θ 는 토양수분함량 (cm^3/cm^3)이며, θ_s 는 포화상태의 수분함량이며, T 는 온도 ($^\circ\text{C}$)이다.

(2) 환원층에서의 반응 및 이동

환원층에서의 질소의 수지는 식 (3-3-27)과 같다.

$$AMMO_t = AMMO_{t-1} + fERNH_2_t + DWNH_t + MINEL_t + FIXN_t - RNIT_2_t - UPNH_t - PERNH_t \quad (3-3-27)$$

여기서, $AMMO$ 는 암모니아태 질소의 량 (kg/ha), $FERNH_2$ 는 토층 시비량 (kg/ha), $DWNH$ 는 산화층으로부터의 침투량 (kg/ha), $MINEL$ 은 토층에서의 무기화량 (kg/ha), $FIXN$ 은 대기로부터의 질소 고정량 (kg/ha), $RNIT_2$ 는 토층에서의 질산화량 (kg/ha), $UPNH$ 는 작물 흡수량 (kg/ha), $PERNH$ 는 작토층 이하로의 침투량 (kg/ha)이다.

질산태 질소의 수지는 식 (3-3-28)과 같다.

$$NOX_t = NOX_{t-1} + FERNO_2_t + DWNO_t + RNIT_2_t - DNI_t - UPNO_t - PERNO_t \quad (3-3-28)$$

여기서, NOX 는 질산태 질소의 량 (kg/ha), $FERNO_2$ 는 토층 시비량 (kg/ha), $DWNO$ 는 산화층으로부터의 침투량 (kg/ha), $RNIT_2$ 는 토층에서의 질산화량 (kg/ha), DNI 는 환원층에서의 탈질량, $UPNO$ 는 작물 흡수량 (kg/ha), $PERNO$ 는 작토층 이하로의 침투량 (kg/ha) 등이다.

① 용탈량

근근역이하로의 용탈량은 용존 농도에 좌우되는 것으로 가정하였으며 산화층에서와 같이 Langmuir의 등은 흡착식에 의하여 용존 농도를 구한 후 침투량을 곱하였다. 관계식은 식 (3-3-29) 및 식 (3-3-30)과 같다.

$$PERNH = C_{SNH} \times INF \times 0.01 \quad (3-3-29)$$

$$PERNO = C_{SNO} \times INF \times 0.01 \quad (3-3-30)$$

② 토양유기물의 무기물화

대부분의 연구에서는 유기물의 무기화를 아래식과 같은 잠재 무기화량에 대한 1차 반응식으로 표현하고 있다. 반응식은 식 (3-3-31)과 같다.

$$MINEL = K_m' \times f_m(\theta) \times g_m(T) \times [N] \quad (3-3-31)$$

여기서, K_m' 은 광물화율 계수 (day^{-1}), $f_m(\theta)$ 는 토양수분함수, $g_m(T)$ 는 온도함수, $[N]$ 는 무기화 가능 질소 (kg/ha)이다. 광물화 가능 질소는 전질소의 10 ~ 30% 정도로 알려져 있다. 광물화 가능 질소 N ($[N]$)를 총유기질소 N (C_{on})로 표현하면 식 (3-3-32)와 같다.

$$MINEL = K_m \times f_m(\theta) \times g_m(T) \times [C_{on}] \quad (3-3-32)$$

토양수분 함량에 대한 함수 $f_m(\theta)$ 는 식 (3-3-33)과 같다. 이때, 광물화율계수 K_m 은 0.028 day^{-1} 이다.

$$f_m(\theta) = \begin{cases} 1 - (\theta/\theta_s - 0.6) & \text{if } \theta/\theta_s \geq 0.6 \\ 1 - (0.6 - \theta/\theta_s) & \text{if } 0.6 > \theta/\theta_s \geq 0.32 \\ 0 & \text{if } \theta/\theta_s < 0.32 \end{cases} \quad (3-3-33)$$

여기서, θ_s 는 포화상태에서의 수분함량 (cm^3/cm^3 , volumetric water content at 100% saturation)이다.

온도에 대한 함수는 식 (3-3-34)와 같다 (Stanford and Smith, 1973).

$$g_m(T) = 1.071^{(T-35)} \quad (3-3-34)$$

③ 작물흡수량

작물에 의한 영양물질의 흡수량은 작물성장함수 및 작물 내 영양물질 함량에 따른다.

작물의 성장은 작물의 물 사용량, 질소 흡수량과 작물 내 질소함유량의 함수로 나타내었다. 누가 건물중량은 식 (3-3-35)와 같다.

$$DM_i = \frac{\sum WU_i}{PWU} YP \times K \quad (3-3-35)$$

여기서, DM은 i일의 누가 건물량 (kg/ha)이며, WU는 일별 물 사용량 (mm), PWU는 생육기간 전체의 물 사용량 (mm)이며, YP는 잠재수확량 (kg/ha), K는 수확기 수확량에 대한 건물량 비로 0.23을 사용하였다.

작물 중의 질소농도는 작물성장의 함수로 식 (3-3-36)과 같다.

$$C_i = c_1 (DM_i / TDM)^{c_2} \quad (3-3-36)$$

여기서, C는 i일의 작물 내 질소농도이며, TDM은 생육기간 중 총 건물량이며, c_1 , c_2 는 Smith 등에 의해 정의된 계수들이다.

누가 질소흡수량은 식 (3-3-37)로 나타낼 수 있다.

$$UN_i = C_i DM_i \quad (3-3-37)$$

따라서, 암모니아태 및 질산태의 흡수량은 식 (3-3-38) 및 식 (3-3-39)로 표현할 수 있다.

$$UPNH = UP \times \frac{AMMO}{AMMO + NOX} \quad (3-3-38)$$

$$UPNO = UP \times \frac{NOX}{AMMO + NOX} \quad (3-3-39)$$

④ 질산화

화목과인 벼는 줄기의 통기조직을 통해 산소를 뿌리로 전달하여 뿌리 주변은 호기성 상태가 되어 뿌리 주변에 공생하는 호기성 미생물에 의하여 질산화가 일어나게 된다. 환원층에서의 질산화량은 산화층에서의 질산화식과 같으나, 질산화율 계수 Kn을 변동시켜 적용하였다.

⑤ 탈질

산화와 환원이 분리된 논토양에서는 탈질에 의한 질소의 손실이 발생하게 된다. 산화층에서 질산화 작용으로 암모니아태 질소가 질산태 질소로 변환된 후 침투에 의해 환원층으로 이동된 질산태 질소는 혐기성 상태에서 탈질작용이 일어나게 되는데 반응식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

탈질율은 질산태 질소의 농도, 분해가능 유기탄소의 공급량, 혐기조건, 온도 등의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 탈질율은 식 (3-3-40)으로 나타낼 수 있다.

$$DNT = V_{md} \times \frac{0.1NOX}{k_{dnt} + 0.1NOX} \times f_d(\theta) \times g_d(\theta) \times h_d(C) \times 10 \quad (3-3-40)$$

토양수분과 온도에 대한 보정함수는 식 (3-3-41)과 같다.

$$f_d(\theta) = 0 \quad \theta \leq \theta_d \quad (3-3-41)$$

$$= [(\theta - \theta_d) / (\theta_s - \theta_d)]^m \quad \theta_d \leq \theta \leq \theta_s$$

$$g_d(T) = 1.12^{(T-20)} \quad (3-3-42)$$

여기서, θ_d 는 탈질이 발생하지 않기 시작하는 토양수분 함량을 말한다. 분해가능 유기탄소의 탈질에 대한 영향식은 식 (3-3-43)과 같다.

$$h_d(C) = \frac{C_{wc}}{k_c + C_{wc}} \quad (3-3-43)$$

여기서, C_{wc} 는 추출유기탄소량 (g/m^2), k_c 는 상수이다.

추출유기탄소량(C_{wc})은 토양의 총 탄소함량 C_{tc} ($g/100g$ soil)로부터 계산할 수 있으며, 식 (3-3-44)로 나타낼 수 있다 (Shon, 1998).

$$C_{wc} = \rho_b \times (19.2thies C_{tc} - 4.99) \times SEDPTH \quad (3-3-44)$$

여기서, ρ_b 는 bulk density (g/cm^3)이며, SDEPTH는 환원토층 깊이 (m)이다.

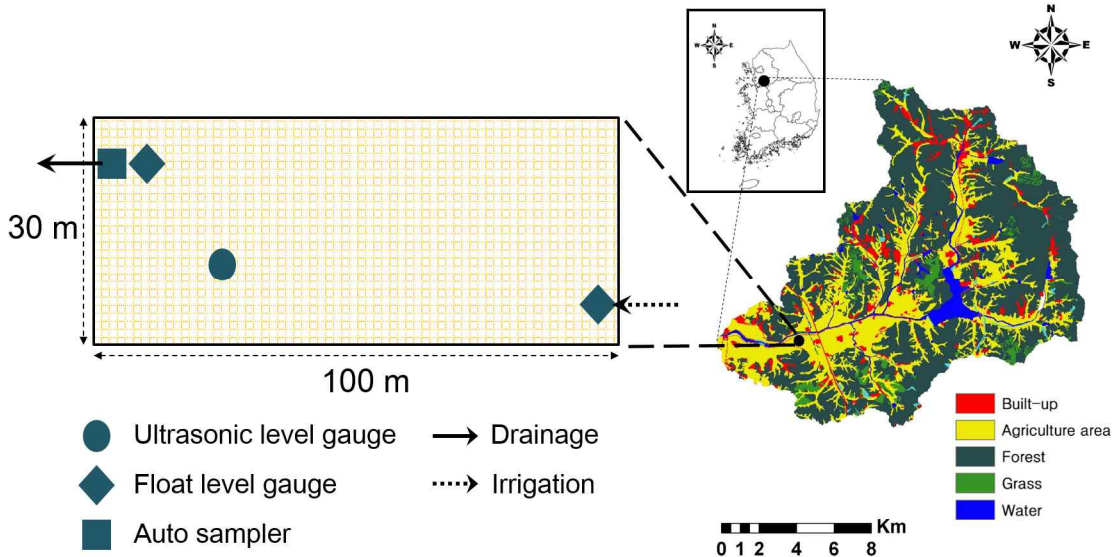
이상의 수정 CREAMS-PADDY 모형의 물질수지 방정식을 정리하면 <표 3-3-3>과 같다.

3.2. 대상지구 및 자료구축

본 연구에서는 경기도 평택시 서탄면 진목리에 위치한 이동저수지 관개 논을 연구 대상으로 선정하였다. 시험포장은 용남용수구역 중 토지이용이 논이 우점하고 있는 지역의 논으로, 크기는 30 m × 100 m, 토양통은 신흥통 (Sh)이다. 본 시험포장은 서울대학교 지역시스템공학과에서 정량적인 물수지 및 물질수지 산정을 위하여 수문 및 수질 모니터링을 시행하고 있으며 관개량, 지표유출량, 담수심 측정을 위한 초음파 수위계 (SONDAR Ultrasonic level meter, ISTECHNOLOGIES, Korea) 및 부자식 수위계 (Thalimedes, OTT Hydrometrie, Germany), 수질 시료 채취를 위한 자동 채수기 (ISCO 6712 Portable Sampler, Telydyne Isco, Inc., USA)가 시험포장에 설치되어 있다. 기상인자 및 강우량 측정을 위한 강우계 (HOBO Data Logging Rain Gauge, Dalotech, USA)와 자동기상관측소 (Automatic Weater Station, AWS)는 포장에서 동쪽으로 약 2 km 떨어진 곳에 설치되어 있다. (그림 3-3-10)은 시험포장의 위치 및 설

계 모식도를 보여주고 있다 (송정헌 등, 2012).

본 연구에서 개발한 전처리 컴포넌트에서 물꼬 높이, 최소담수심 등의 지형자료와 시비량, 시비시기, 관개 시작 및 종료 시기, 그리고 수확 시기 등의 매개변수를 쉽게 입력할 수 있었다. 또한, 모든 매개변수는 SI단위로 입력할 수 있었다.



(그림 3-3-10) 대상지구의 위치 및 모식도

가. 물수지 분석

CREAMS-PADDY 모형의 지표유출량 입력자료 구축과 보정 및 검정을 위하여 시험포장의 2011~2012년도 영농기 (5월 1일~9월 20일)의 물수지를 분석하였다. 물수지 식은 식 (3-3-45)와 같다.

$$W_t = W_{t-1} + IR_t + PR_t - INF_t - ET_t - DR_t \quad (3-3-45)$$

여기서, W_t 는 담수심, W_{t-1} 는 전날 담수심, IR_t 는 관개량, PR_t 는 강우량, INF_t 는 침투량, ET_t 는 증발산량, DR_t 는 지표유출량이다.

물수지 분석을 위하여 관개량, 강우량, 담수심은 10분 단위로 측정된 실측치를 이용하였고, 증발산량은 AWS에서 수집한 평균온도, 상대습도, 평균풍속, 일사량과 수원지방의 순별 작물계수 (유승환 et al., 2006)를 이용하여 Penmann-Monteith 공식으로 산정하였다. 침투량은 시험포장 실측치와 결측기간에 대해 선행 연구 (황하선, 2002; 한국농어촌공사 보고서, 2011)를 참고하여 이용하였다. 지표유출량은 10분 단위로 측정된 실측치를 기본으로 이용하고, 결측기간에 대해 물수지 분석결과를 이용하였다 (송정헌 등, 2012).

나. 물질수지 분석

CREAMS-PADDY 모형의 영양물질모형의 입력자료 구축과 모형의 보정 및 검정을 위하여 2011~2012년도 영농기 (5월 1일~9월 20일)의 물질수지를 분석하였다. 물질수

지 식은 식 (3-3-46)과 같다.

$$\Delta S = IR_m + PR_m + FER_m - INF_m - PU_m - DR_m \quad (3-3-46)$$

여기서, IR_m 는 관개에 의한 부하량, PR_m 은 강우에 의한 부하량, FER_m 은 시비에 의한 부하량, INF_m 은 침투에 의한 부하량, PU_m 은 식물흡수에 의한 부하량, DR_m 은 지표유출에 의한 부하량이다.

물질수지 분석을 위하여 관개수 및 논물의 시료를 2주 1회 단위로 정기 채취하였고, 시비 후 논물 농도 변화를 파악하기 위해 기비 시비 후 논물을 12시간 간격으로 24회 집중 채취하였다. 또한, 강우 시 집중조사를 위하여 자동채수기를 강우계와 연계하여, 15분에 2.54 mm(0.1 inch)이상의 강우 발생시 유출수를 채취하였다. 수질 시료의 분석은 서울대학교 농업과학공동기기센터 (National Instrumentation Center for Environmental Management, NICEM)에 의뢰하였으며 T-N의 분석 방법은 Kjeldahl method, T-P의 분석방법은 ICP-Atomic Emission Spectroscopy이다.

다. 포장단위 모니터링 분석 결과

시험포장의 2011~2012년도 영농기 물수지 분석결과를 나타내면 <표 3-3-4>와 같고, 물질수지 분석결과를 나타내면 <표 3-3-5>, <표 3-3-6>과 같다. 물수지 분석 결과 강우량은 7, 8월 (2011년 951.2 mm, 2012년 998.5 mm)에 집중되어 나타났다. 관개량은 영농초기인 5월 (2011년 216.0 mm, 2012년 242.3 mm), 6월 (2011년 148.0 mm, 2012년 220.8 mm)에 집중되어 나타났다. 지표유출량은 관개가 영농초기에 과다하게 이루어져 5월에 2011년 207.3 mm, 2012년 220.7 mm로 나타났고, 집중강우 기간인 7월에 2011년 391.0 mm, 2012년 358.4 mm, 8월에 2011년 323.6 mm, 2012년 391.8 mm로 나타났다. 증발산량은 2011년 598.9 mm, 2012년 662.7 mm, 침투량은 2011년 111.5 mm, 2012년 128.4 mm로 나타났다.

수질 분석 결과 관개수는 T-N 0.3~2.0 mg/L, T-P 0.01~0.04 mg/L로 나타났고, 강우는 T-N 0.9 mg/L, T-P 0.04 mg/L, 유출수는 T-N 0.5~20.3 mg/L, T-P 0.03~0.70 mg/L로 나타났다.

물질수지 분석 결과 시험포장으로 유입되는 부하량은 강우에 의해 T-N은 2011년 13.24 kg/ha, 2012년 12.9 kg/ha, T-P는 2011년 0.50 kg/ha, 2012년 0.54 kg/ha, 관개에 의해 T-N은 2011년 7.53 kg/ha, 2012년 9.03 kg/ha, T-P는 2011년 0.38 kg/ha, 2012년 0.69 kg/ha, 시비에 의해 T-N 2011년 181.00 kg/ha, 2012년 153.0 kg/ha, T-P는 2011년 56.00 kg/ha, 2012년 87.00 kg/ha로 나타났다. 시험포장에서 지표유출로 배출되는 부하량은 T-N은 2011년 30.77 kg/ha, 2012년 27.98 kg/ha, T-P의 경우 2011년 1.67 kg/ha, 2012년 1.89 kg/ha로 나타났다. 2012년이 2011년에 비해 T-N 배출부하량이 감소하고 T-P 배출부하량이 증가한 것은 2012년에 T-N은 시비량이 감소하였고, T-P는 시비량이 증가하였기 때문으로 사료된다. 일반적으로 논은 지역적인 특성과 영농기작의 차이로 배출부하량이 다르게 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 선행 연구의 관측 결과는 본 연구의 측정 결과와 상이할 수 있다.

<표 3-3-4> 대상지구의 물수지 분석

Item	Month	Rain. (mm)	Irri. (mm)	Runoff (mm)	Evapo. (mm)	Infilt. (mm)
2011	May.	108.8	216.0	207.3	52.8	50.1
	Jun.	291.8	148.0	294.2	145.4	32.7
	Jul.	644.2	12.0	391.0	146.8	17.6
	Aug.	307.0	139.0	323.6	168.6	8.9
	Sep.	39.4	23.0	15.9	85.4	2.1
	Sum	1,391.2	538.0	1,232.1	598.9	111.5
2012	May.	16.5	242.3	220.7	26.2	50.1
	Jun.	100.8	220.8	278.4	182.2	32.7
	Jul.	572.3	65.5	358.4	168.4	22.5
	Aug.	426.2	159.0	391.8	212.6	15.1
	Sep.	239.0	7.0	102.5	73.3	8.0
	Sum	1,354.8	694.7	1,351.9	662.7	128.4

<표 3-3-5> 대상지구의 T-N 수치 분석

Item	Month	Rain. (kg/ha)	Irri. (kg/ha)	Ferti. (kg/ha)	Runoff (kg/ha)	Infilt. (kg/ha)
2011	May.	1.04	0.90	168.00	13.37	3.41
	Jun.	2.78	3.31	0.00	8.55	1.42
	Jul.	6.13	0.27	0.00	5.83	0.26
	Aug.	2.92	2.60	13.00	2.70	0.09
	Sep.	0.38	0.46	0.00	0.32	0.03
	Sum	13.24	7.53	181.00	30.77	5.21
2012	May.	0.16	3.15	140.00	14.63	3.67
	Jun.	0.96	2.87		7.93	0.21
	Jul.	5.45	0.85		0.41	0.05
	Aug.	4.06	2.07	13.00	4.32	0.21
	Sep.	2.28	0.09		0.68	0.05
	Sum	12.90	9.03	153.00	27.98	4.19

<표 3-3-6> 대상지구의 T-P 수치 분석

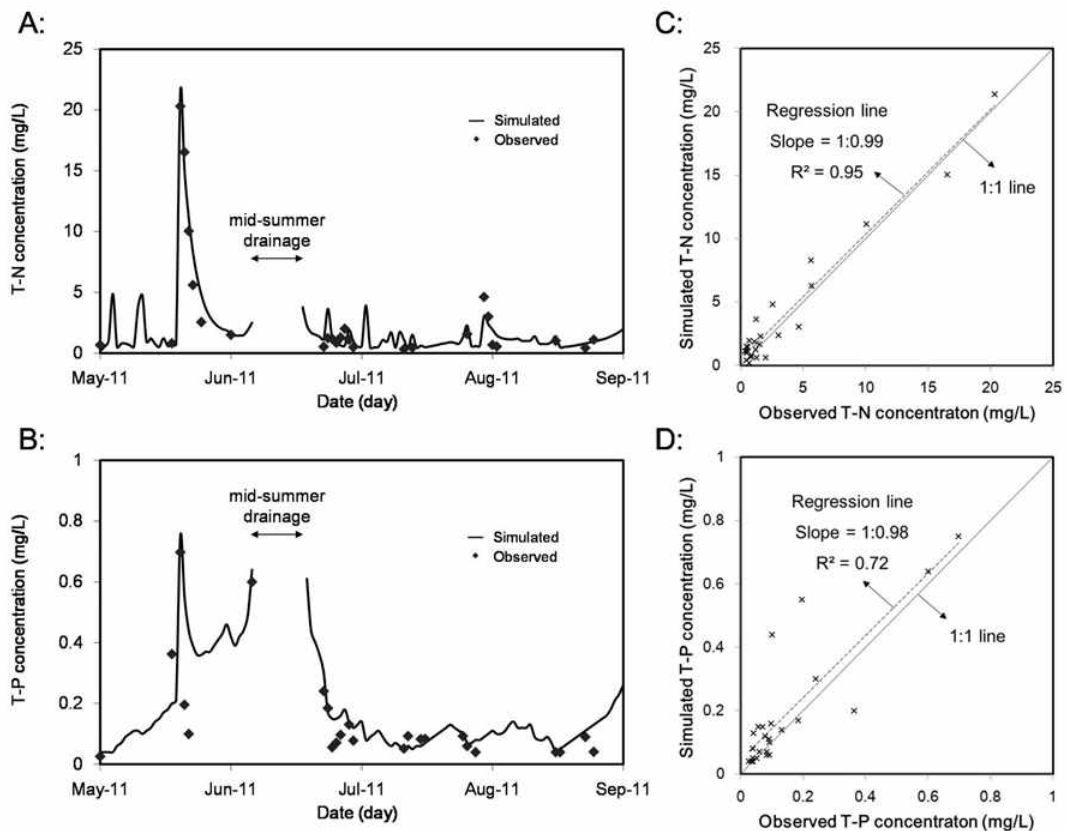
Item	Month	Rain. (kg/ha)	Irri. (kg/ha)	Ferti. (kg/ha)	Runoff (kg/ha)	Infilt. (kg/ha)
2011	May.	0.04	0.08	56.00	0.66	0.16
	Jun.	0.11	0.17		0.45	0.10
	Jul.	0.23	0.02		0.40	0.02
	Aug.	0.11	0.10		0.12	0.00
	Sep.	0.01	0.01	56.00	0.04	0.00
	Sum	0.50	0.38		1.67	0.28
2012	May.	0.01	0.24	87.00	0.83	0.21
	Jun.	0.04	0.22		0.47	0.02
	Jul.	0.23	0.07		0.43	0.03
	Aug.	0.17	0.16		0.11	0.01
	Sep.	0.10	0.01		0.06	0.00
	Sum	0.54	0.69	87.00	1.89	0.27

3.3. 모형의 적용

가. 모형의 보정 및 검증

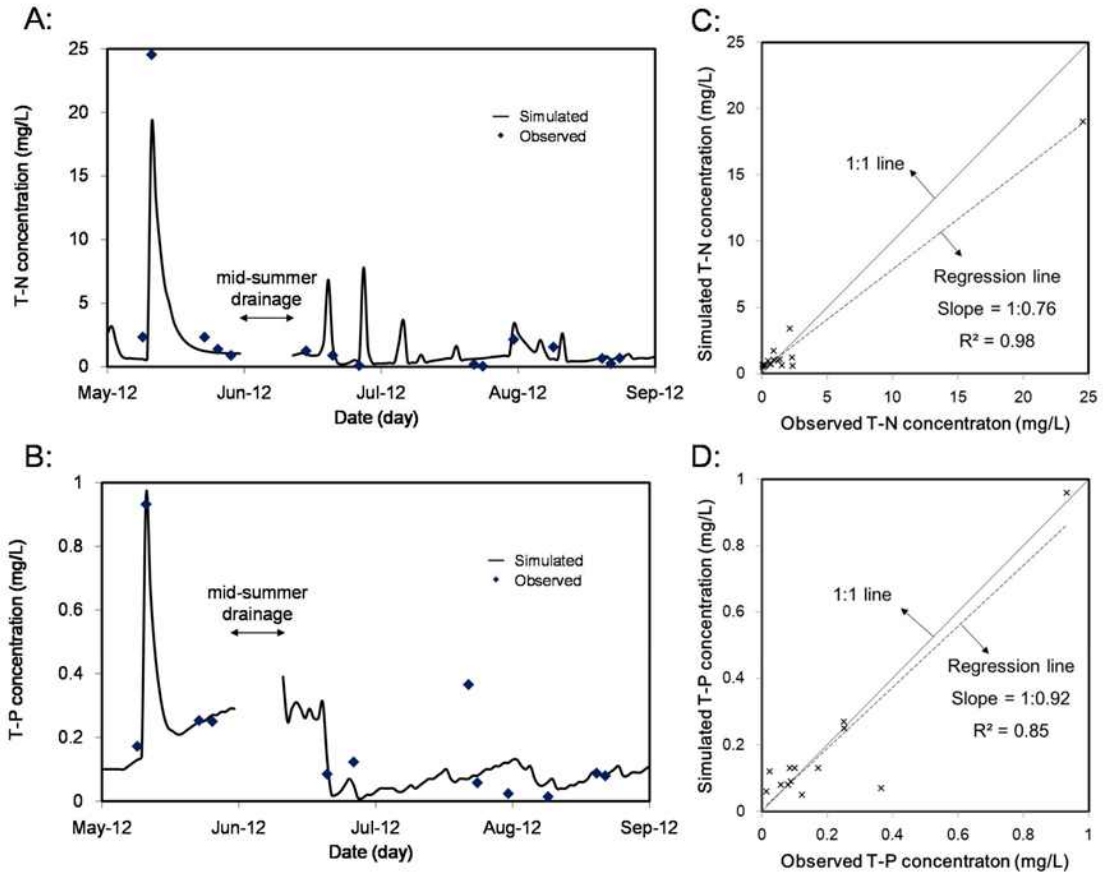
수정 CREAMS-PADDY 모형의 보정 및 검증을 위해 시험지구의 2011~2012년 물수지 분석 및 물질수지 분석 결과 자료를 이용하여 지표유출량과 논물의 T-N, T-P를 단순시행착오법을 이용하여 보정하였다. 보정 및 검증에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE), 상대평균절대오차 (Relative Mean Absolute Error, RMAE), Nash-Sutcliffe 효율지수 (Efficiency Index, NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수 (R^2) 등의 통계적인 변량을 사용하였다 (Moriasi et al., 2007).

<표 3-3-8>은 보정 및 검증에 사용된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-3-7>은 보정 및 검증결과 통계적 변량을 나타낸다. (그림 3-3-11) - (그림 3-3-12)는 각각 논물의 T-N, T-P의 자료 보정 (2011년) 및 검증 (2012년) 기간에 대한 모의결과를 실측치와 비교하여 보여주고 있다. 논물의 T-N, T-P 실측치는 시비 후 농도가 급속히 감소하는 것으로 나타나는데, 이를 반영하여 모형의 매개변수를 조정하였다. 논물의 T-N 보정 결과 RMSE는 1.12 mg/L, NSE는 0.94, R^2 는 0.95의 값을 보였으며, 검증 결과 RMSE는 1.57 mg/L, NSE는 0.93, R^2 는 0.98의 값으로 나타났다. T-P 보정 결과 RMSE는 0.11 mg/L, NSE는 0.58, R^2 는 0.72로 나타났으며, 검증 결과 RMSE는 0.09 mg/L, NSE는 0.50, R^2 는 0.85로 나타났다.



(그림 3-3-11) 보정기간동안의 T-N, T-P 모의치 및 실측치

(A/B: 시간에 따른 변화 C/D: 산포도)



(그림 3-3-12) 검정기간동안의 T-N, T-P 모의치 및 실측치
(A/B: 시간에 따른 변화 C/D: 산포도)

<표 3-3-7> 수정 CREAMS-PADDY 모형의 통계적 변량 결과

기간	모의요소	평균 농도		통계적 변량		
		실측치	모의치	R ²	RMSE (mg l ⁻¹)	NSE
보정	T-N	2.99	1.96	0.95	1.12	0.94
	T-P	0.14	0.23	0.72	0.11	0.58
검정	T-N	2.49	1.65	0.98	1.57	0.93
	T-P	0.20	0.17	0.85	0.09	0.50

<표 3-3-8> 수정 CREAMS-PADDY 모형의 보정 매개변수

매개변수	CKND	CKNDP	CKAD	CKR	GAMMA
보정치	0.055	0.01	0.00128	90,000	0.08

* CKND means nitrogen immobilization coefficient
 CKNDP means phosphate immobilization coefficient
 CKAD means adsorption equilibrium coefficient
 CKR means plant uptake coefficient
 GAMMA means correction for temperature coefficient

나. 영농방법 시나리오 적용

(1) 시나리오 구성

본 연구에서는 논에서의 물관리에 따른 배출부하량 저감효과를 평가하기 위하여 물관리 인자로 물꼬높이와 최소담수심별 관개방법에 따라 시나리오를 구성하였다.

윤춘경 등 (2003)에 의하면 절수관개, 물꼬 높이 상승 등의 물관리를 통해 지표배수량을 저감하면 논에서의 또한 배출부하량을 저감할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 물관리에 따른 효과는 농업용수 공급량을 절약할 수 있으며 강우를 저장할 수 있는 공간이 증가하여 관개수요량을 줄일 수 있으며 배출부하량을 저감할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 물관리와 배출부하량 저감과의 관계를 조사한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 9개의 물관리 시나리오에 따른 논 비점 배출부하량을 조사하고자 한다. 물관리 시나리오는 선행 연구결과를 참조하여 물꼬 높이의 범위는 80, 100, 120 mm로 선정하였으며 최소담수심의 범위는 20, 40, 60mm로 선정하였다 <표 3-3-9>.

<표 3-3-9> 물관리 시나리오

시나리오	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)
80-VSD	80	20
80-SD		40
80-DD		60
100-VSD	100	20
100-SD		40
100-DD		60
120-VSD	120	20
120-SD		40
120-DD		60

a VSD: 최소 담수심 20 mm

b SD: 최소 담수심 40 mm

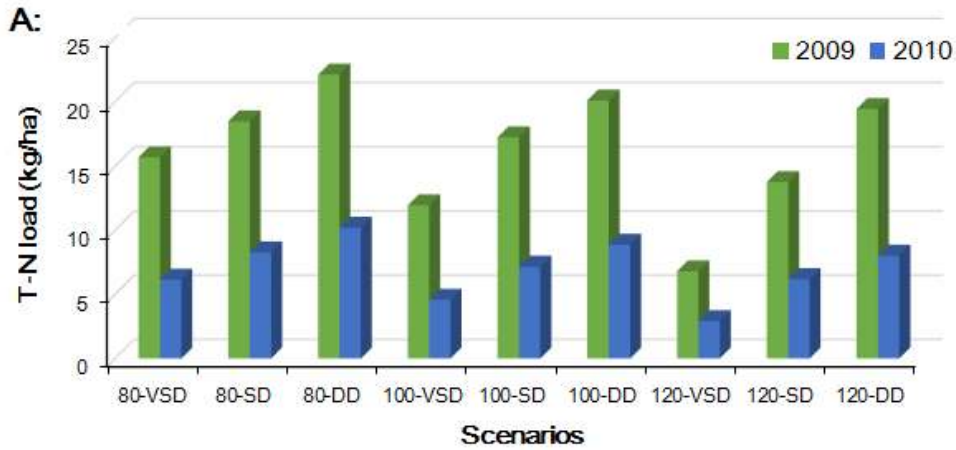
c DD: 최소 담수심 60 mm

(2) 시나리오 적용 결과

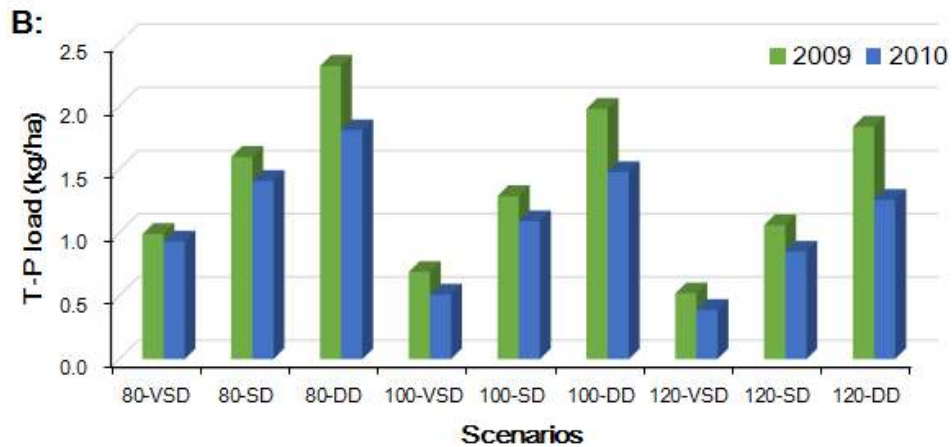
본 연구에서는 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 물꼬높이와 최소담수심별 관개방법에 따른 배출부하량 변화를 2009 ~ 2010년의 영농기간 (5월1일 ~ 9월20일)에 대해 추정하고 정량적으로 비교하였다. <표 3-3-10>은 각 시나리오에 따른 관개량, 배수량, T-N, T-P 총량을, (그림 3-3-13), (그림 3-3-14)는 각 시나리오에 따른 T-N, T-P 배출부하량을 나타낸다.

모든 시나리오에서 물꼬높이가 같을 때 최소담수심이 낮을수록, 즉 DD-SD-VSD 순으로 배출부하량이 적은 것으로 나타났다. <표 3-3-10>에서 물꼬높이가 80 mm인 경우 최소담수심이 60 mm에서 40 mm로 감소할 때 T-N은 16 ~ 19%, T-P는 22 ~ 31% 감소하였고, 40 mm에서 20 mm로 감소할 때 T-N은 15 ~ 27%, T-P는 34 ~ 38% 감소하였다. 물꼬높이가 100 mm인 경우 최소담수심이 60 mm에서 40 mm로 감소할 때 T-N은 14 ~ 19%, T-P는 26 ~ 35% 감소하였고, 40 mm에서 20 mm로 감소할 때 T-N은 31 ~ 36%, T-P는 47 ~ 53% 감소하였다. 물꼬높이가 120 mm인 경우 최소담수심이 60 mm에서 40 mm로 감소할 때 T-N은 23 ~ 29%, T-P는 33 ~ 42% 감소하였고, 40 mm에서 20 mm로 감소할 때 T-N은 50 ~ 53%, T-P는 51 ~ 54% 감소하였

다. 이는 최소담수심을 알게 관개할수록, 즉 관개량을 줄일수록 배수량이 저감되어 배출 부하량도 함께 감소하기 때문이다. 또한, 최소담수심을 낮춰갈수록 T-N보다 T-P의 감소폭이 더 큰 것으로 나타났으며 물꼬높이가 높아질수록 최소담수심 저감으로 인한 배출부하량의 감소폭은 더 크게 나타났다.



(그림 3-3-13) 2009 ~ 2010년의 시나리오별 T-N부하량 모의결과



(그림 3-3-14) 2009 ~ 2010년의 시나리오별 T-P부하량 모의결과

한편 최소담수심이 같은 관개방법을 이용할 때 역시 모든 시나리오에서 물꼬높이가 높아질수록 배출부하량이 적게 나타났다. <표 3-3-10>에서 VSD인 경우 물꼬높이가 80 mm에서 100 mm로 증가할 때 T-N은 24 ~ 25%, T-P는 30 ~ 45% 감소하였고, 100 mm에서 120 mm로 증가할 때 T-N은 37 ~ 43%, T-P는 24 ~ 25% 감소하였다. SD인 경우 물꼬높이가 80 mm에서 100 mm로 증가할 때 T-N은 7 ~ 13%, T-P는 19 ~ 23% 감소하였고, 100 mm에서 120 mm로 증가할 때 T-N은 14 ~ 20%, T-P는 18 ~ 22% 감소하였다. DD인 경우 물꼬높이가 80 mm에서 100 mm로 증가할 때 T-N은 9 ~ 13%, T-P는 15 ~ 18% 감소하였고, 100 mm에서 120 mm로 증가할 때 T-N은 3 ~ 10%, T-P는 7 ~ 15% 감소하였다. 이는 물꼬높이를 높이면 강우의 저류 효과가 증가하여 배출부하량이 저감되기 때문이며, 최소담수심이 낮은 관개방법일수

록, 즉 DD-SD-VSD 순으로 물꼬높이 상승으로 인한 배출부하량의 감소폭이 더 큰 것으로 나타났다.

편의를 위하여 80-DD를 기준으로 보았을 때 9가지 시나리오 중에서 120-VSD를 택하면 배출부하량이 최대 70~80%까지 저감되는 것으로 나타났다. 즉 물꼬높이 80 mm, 최소담수심 60 mm 시나리오 대비 물꼬높이 120 mm, 최소담수심 20 mm 시나리오의 경우 T-N, T-P 배출부하량이 70~80% 저감되는 효과를 볼 수 있다.

<표 3-3-10> 물관리 시나리오에 따른 모의 결과

시나리오	강우	관개		배수		T-N		T-P	
	mm	mm	%	mm	%	kg/ha	%	kg/ha	%
2009									
80-VSD		302.9	60	738.9	79	15.7	71	0.99	43
80-SD		382.9	75	818.6	87	18.5	84	1.60	69
80-DD		508.6	100	936.2	100	22.1	100	2.32	100
100-VSD		242.9	48	678.4	72	11.9	54	0.69	30
100-SD	942	322.9	63	759.0	81	17.2	78	1.29	56
100-DD		402.9	79	838.7	90	20.1	91	1.98	85
120-VSD		188.6	37	623.8	67	6.8	31	0.52	22
120-SD		262.9	52	698.2	75	13.7	62	1.06	46
120-DD		342.9	67	778.8	83	19.4	88	1.84	79
2010									
80-VSD		109.6	35	494.8	69	6.1	60	0.93	51
80-SD		189.5	61	595.1	83	8.3	81	1.41	78
80-DD		310.1	100	717.8	100	10.2	100	1.81	100
100-VSD		58.0	19	423.9	59	4.6	45	0.51	28
100-SD	762.3	129.5	42	514.9	72	7.2	71	1.09	60
100-DD		209.6	68	614.9	86	8.9	87	1.48	82
120-VSD		38.3	12	384.0	53	2.9	28	0.39	22
120-SD		78.0	25	444.0	62	6.2	61	0.85	47
120-DD		149.6	48	534.7	74	8.0	78	1.26	70

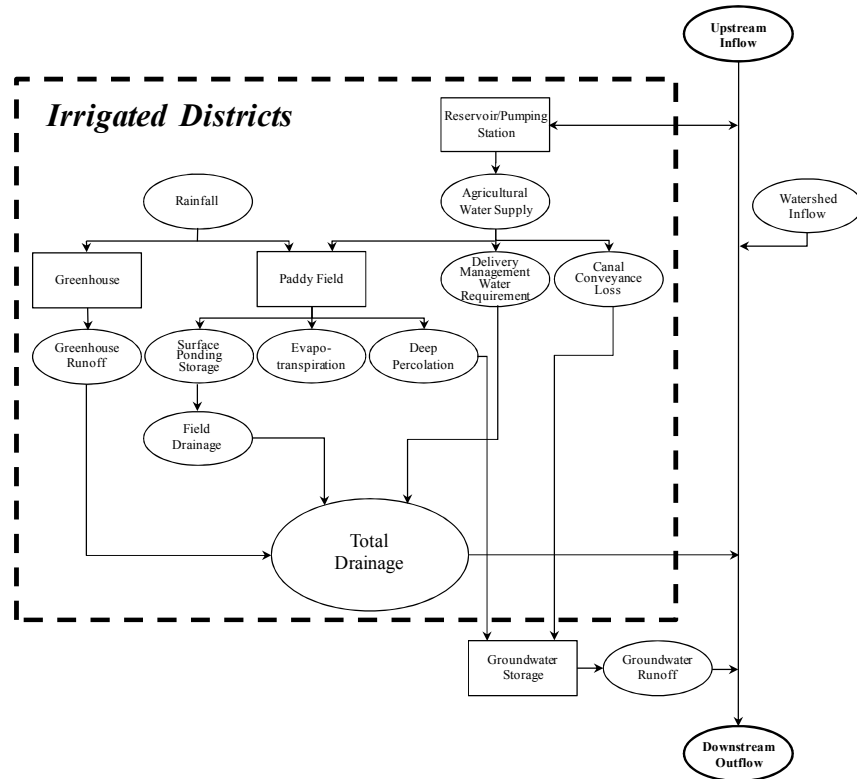
4. 복합영농 관개지구 배수량 추정 모형의 개발 및 적용

4.1. 복합영농 관개지구 수문해석 모형의 개발

가. 복합영농 관개지구 배수량 모형의 개발

관개지구는 논벼의 담수재배를 위해 수리시설물로부터 농업용수를 공급받는 지역으로, 기존의 논이 시설재배지로 토지이용이 전환된 지역을 포함한다. 논과 시설재배지는 수문 기작이 상이하다. 논은 4월부터 9월까지 벼의 생육을 위하여 수원공으로부터 농업용수를 공급받아 담수재배를 하며, 시설재배지는 불투수면으로 주로 지하수를 취수하여 작물을 재배한다. 본 연구에서는 수리시설물, 논, 시설재배지, 용배수로로 구성되는 관개지구를

복합영농 관개지구라 정의하였다. 복합영농 관개지구의 수문순환을 정리하면 (그림 3-3-15)와 같다.



(그림 3-3-15) 복합영농 관개지구의 수문순환 모식도 (송정현, 2013)

수원공으로부터의 농업용수 공급량은 용수를 송수하는 과정에서 증발 및 침투에 의해 손실되는 송수 손실 수량 (conveyance loss)이 발생한다 (정하우, 2006). 일부는 포장으로 공급되지 않고 용수로에서 하천으로 배수되는데, 이를 용수로 배수량 (delivery management water requirement)이라 한다. 논 포장으로 공급된 용수량과 강우량은 담수심을 높인다. 담수된 수량 중 물꼬높이 이상의 수량은 물꼬를 넘어 배수로로 흘러들어가며, 이를 논 포장 배수량이라 한다. 시설재배지의 강우시 유출은 시설사이에 설치된 수로를 통하여 배수로 또는 하천으로 흘러들어가게 되며, 지하수로부터 취수한 관개량은 침투되어 지표 유출에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 복합영농 관개지구에서 발생하는 총 배수량은 식 (3-3-47)로부터 구할 수 있다 (송정현 등, 2013a).

$$TDR_t = DR_t + ICD_t + GSR_t \quad (3-3-47)$$

여기서, TDR 는 관개지구의 총 배수량 (mm), DR 은 논 포장 배수량 (mm), ICD 은 용수로 배수량 (mm), GSR 은 시설재배지의 유출량 (mm)이다.

복합영농 관개지구 배수량은 논 광역 배수량 모형, 시설재배지 유출량 모형으로부터 모의한다. 농업용수 공급량은 [제 3 장 제 2 절]에서 개발된 농업용수 공급량 모형에서 모의되며 논 광역 배수량 모형의 입력자료로 이용된다. 논 광역 배수량 모형에 모의한

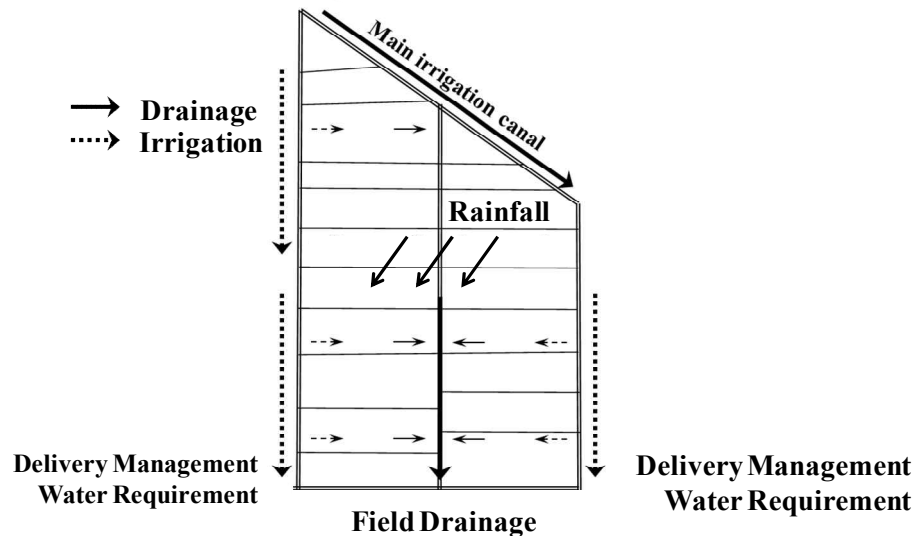
논 포장 배수량 및 용수로 배수량과 시설재배지 유출량 모형에서 모의한 시설재배지 유출량을 합하여 총 배수량을 일별로 추정하도록 구성되어 있다 (송정현 등, 2013a).

(1) 논 광역 배수량

논 광역 배수량은 (그림 3-3-16)과 같이 강수량 또는 관개량이 논 포장으로 유입되어 배수로로 흘러들어가는 논 포장 배수량 (field drainage)과 수리시설물에서 공급된 용수량 중 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 용수로 배수량 (delivery management water requirement)으로 구성된다. 논 광역의 배수량은 식 (3-3-48)에 의해 계산된다.

$$PDR_t = DR_t + ICD_t \quad (3-3-48)$$

여기서, PDR 는 논 광역 배수량 (mm), DR 는 논 포장 배수량 (mm), ICD 는 용수로 배수량 (mm)이다.



(그림 3-3-16) 논 광역 배수량의 구성 요소

본 연구에서 논 포장 배수량은 강수량, 관개량, 증발산량, 침투량으로부터 담수심을 추정하고, 물꼬높이를 이용하여 수정 CREAMS-PADDY모형으로부터 모의한다. 용수로 배수량은 농업용수 공급량, 영농 방식 등에 따라 달라지며, 농업용수 공급량과 용수로 배수량의 비를 통해 추정한다.

용수로 배수량은 인위적 물관리 요소로 기후, 용수원의 종류, 영농 방식, 지형인자 등에 따라 달라지며, 실측하여 구하거나 용수로의 경사, 취수구의 높이 등의 인자를 이용하여 물리적 식으로부터 구할 수가 있다. 하지만 용수로 배수량을 물리적 식으로 모의하기에는 입력 자료 수집에 한계가 있고, 모형의 복잡성이 높아지는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 식 (3-3-49)와 같이 용수로 배수량을 농업용수 공급량 중의 비율로부터 추정한다.

$$ICD_t = WU_t \times RICD_t \quad (3-3-49)$$

여기서, $DMWR$ 는 용수로 배수량 (mm), WU 는 농업용수 공급량 (mm), b 는 용수로 배수량의 비율이다.

우리나라는 수원시설물의 용수 계획 시 개수로나 관수로에 관계없이 용수로 배수량의 비율을 농업용수 공급량의 5~10% 정도로 간주하여 적용하고 있다. 그러나 선행연구의 현장 측정 결과에 따르면 수원이 풍부한 지구에서는 용수로 배수량이 공급량의 최대 49%까지 차지하고 있는 것으로 보고하고 있다. 이는 광역 배수량에 큰 영향을 미치며 용수로 배수량을 모의하기 위해서는 지역 특성에 맞는 값을 이용하는 것이 중요하다. <표 3-3-11>은 선행 연구의 용수로 배수량의 현장 측정 결과를 보여주고 있다.

<표 3-3-11> 관측 용수로 배수량의 비율

관개지구	기간 ¹⁾	강수량 (mm)	용수로 배수량 비율 (%)	참고문헌
하천수 관개지구	1998	1,056	36	Kim et al., (2005)
	1999	824	47	
	2001	546	11	
	2002	863	30	
	2003	1,055	49	
양수장 관개지구	2001~2002		37	이용직 등, (2008)
저수지 관개지구	2001~2002		36	
지선	2001~2002		31	

¹⁾ 영농기 동안의 강수량

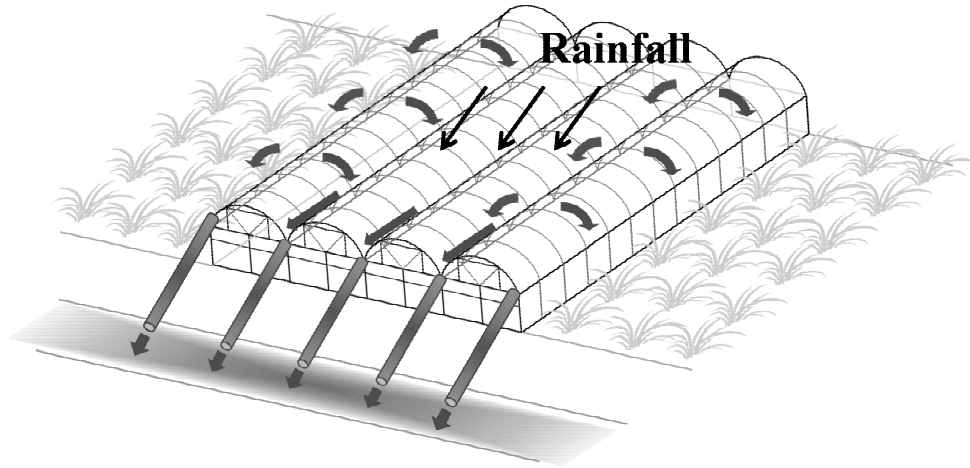
Kim et al., (2005)의 연구 결과에 따르면, 용수로 배수량은 공급량의 11~49%를 차지하고 있으며, 가뭄 시 공급량 대비 용수로 배수량이 감소하는 것으로 보고하고 있다. 이는 가뭄 시 농민들이 농업용수를 최대한 사용하려는 경향이 있기 때문이다. 이용직 등 (2008)에 따르면 양수장, 저수지, 용수 지선 구역의 용수로 배수량은 농업용수 공급량의 31~37%를 차지하는 것으로 보고하고 있다. <표 3-3-11>의 용수로 배수량의 비율 값의 평균은 35%로 나타났다.

용수로 배수량의 비율은 계측 지역의 경우 실측 자료를 이용하고, 미계측 지역의 경우 <표 3-3-11>을 참조하여 수리시설물 종류 및 기상 특성에 맞는 용수로 배수량의 비율을 선정하여, 농업용수 공급량으로부터 용수로 배수량을 추정한다.

(2) 시설재배지 유출량

시설재배지는 불투수면으로 강우시 지표 유출은 (그림 3-3-17)과 같이 강우가 시설재배지로부터 흘러내려 시설사이에 설치된 수로를 통하여 배수로 또는 하천으로 흘러들어간다. 시설재배지의 용수원은 82.8%가 지하수를 사용하는 것으로 조사되고 있으며, 이는 저수지 관개가 시기적, 양적으로 제한을 받으며 지하수가 용수를 사용하기 편리하

기 때문이다 (이남호, 1998). 지하수를 이용하여 관개를 하는 경우 관개에 이용되지 않은 수량은 대부분 침투되거나 증발되며, 이는 지표 배수에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 시설재배지의 유출량 추정에 있어, 지하수 관개에 의한 회귀수량은 무시할 수 있다.



(그림 3-3-17) 시설재배지의 지표 유출 과정

본 연구에서는 김학관 (2009)에 의해 연구된 바 있는 시설재배지에서의 지표면 유출 모의를 위하여 NRCS 유출곡선법 (USDA NRCS, 2004)를 이용하여 식 (3-3-50)과 같이 모의한다.

$$GSR_t = \frac{(RAIN_t - 0.2S)^2}{(RAIN_t + 0.8S)} \quad RAIN_t \geq 0.2S \quad (3-3-50)$$

여기서, GSR 는 시설재배지의 유출량 (mm), $RAIN$ 은 강우량 (mm), S 는 토양수분 저류계수 (mm)이다. 토양수분 저류계수는 식 (3-3-51)로 정의된다.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3-3-51)$$

여기서, CN 은 유출곡선지수로서 토양의 투수성, 토지이용, 선행토양함수조건의 함수이다. 시설재배지의 CN 은 시설 사이의 수로를 통해 배수되는 경우 (흙수로의 경우) CN 을 98로 정의하고 (김학관, 2009), 수로를 통하지 않고 시설재배지 지붕에서 강우가 모여져 직접 하천으로 흘러가는 경우 CN 을 100을 이용한다.

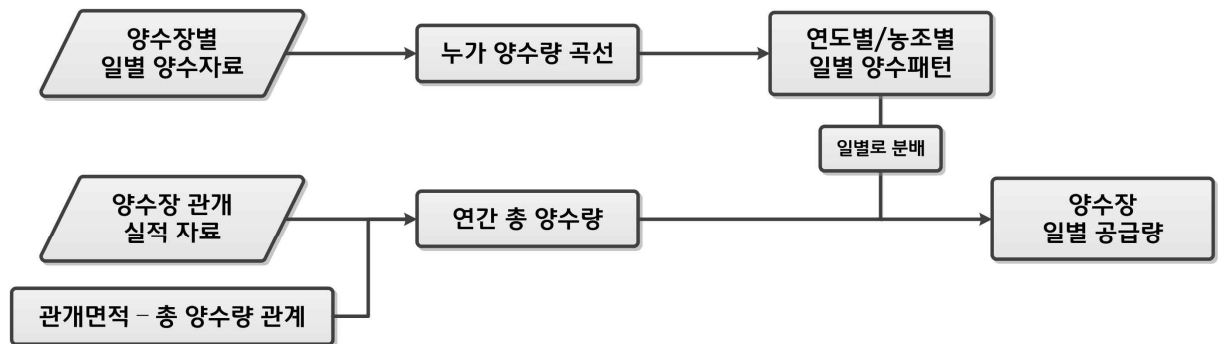
(3) 양수장, 취입보, 관정의 농업용수 공급량

저수지에서의 농업용수 공급량은 [제 3 장 제 2 절]에 자세히 기술하였으며 본 장에서는 저수지이외의 수리시설물인 양수장, 취입보, 그리고 관정에서의 공급량에 대해서 다룬다.

① 양수장 공급량

양수장은 하천, 담수호, 저수지 등의 물을 양수하여 공급하는 수원공으로, 지형적인 영향을 적게 받으며, 취수량을 자유로이 조절할 수 있고, 저수지에 비하여 시설용지가 적고 침수에 의한 수몰 등과 같은 환경적인 문제가 발생하지 않기 때문에 용수공급원으로 많이 이용되고 있다. 일반적으로 양수장은 안정적 용수공급을 위하여 수원이 풍부한 본류 하천이나 하천의 하류에 많이 위치하고 있으며, 전기사용료 등의 관리비가 저수지에 비해 많아지는 단점이 있다 (임상준 등, 2000). 임상준 등 (2000)은 양수장에서 공급량 산정방법을 제안한 바 있으며 다음과 같다.

양수장의 농업용수 공급량은 (그림 3-3-18)과 같이 양수패턴을 이용하여 연간 양수량으로부터 산정한다. 이 때 양수패턴은 연간 양수량에 대한 일별 양수량의 비를 나타낸다. 일반적으로 논벼의 물 소비량이 생육시기별로 다르므로, (그림 3-3-18)과 같이 시기별로 서로 다른 양수패턴을 보이게 된다. 따라서, 본 연구에서는 연도별, 양수장별로 각각 양수패턴을 작성하여 이용하며, 연간 양수량은 실측 양수량 자료를 이용하거나, 과거자료가 없는 경우에는 (그림 3-3-18)과 같이 관개면적과 연간 양수량의 회귀관계식을 이용하여 간접적으로 산정한다 (임상준 등, 2000).



(그림 3-3-18) 양수장 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)

② 취입보 공급량

취입보는 하천수를 취수하여 농업용수를 공급하기 위한 수리시설물로, 하천의 수위를 높게 유지시켜 중력수의 형태로 하류의 관개지구에 물을 공급하는 시스템이다. 취입보는 비교적 건설비가 적게 들고, 시설물의 설치가 용이하기 때문에 오래전부터 소규모 지구의 관개수단으로 많이 이용되어 왔다. 그러나 하천에 설치된 보로 인하여 상류 하천의 유속이 변화되어 국부적으로 모래나 자갈이 퇴적되는 현상이 발생하며, 하천의 수변 환경이 악화되는 문제점이 발생하기도 한다.

수계에서의 취입보 공급량은 (그림 3-3-19)와 같이 농업용수 공급량과 하천의 유량 자료를 이용하여 조사할 수 있다. 농업용수 공급량 (gross water requirement)은 논에 인위적으로 물을 공급하기 위하여 수원공 시설로부터 취수해야 하는 용수량으로서, 논벼의 재배를 위한 용수와 수로를 통하여 운송하기 위한 시설관리용수량을 더하여 구한다. 하천의 유량 자료는 소유역별로 수정 3단 Tank모형을 이용하여 추정할 수 있다.

보 취수량은 설계 취수량을 기준으로 산정하였다. 만일 일별 조용수량이 설계 취수량보다 많을 경우에는 설계 취수량만을 공급하는 것으로 하였으며, 조용수량이 적을 경우에는 조용수량을 공급하는 것으로 하였다. 또한, 하천의 유량이 조용수량 혹은 설계 취수량보다 적을 경우에는 하천 유량을 제한조건으로 설정하여 하천 유량만큼 취수하는 것으로 계산하였다 (임상준, 2000).

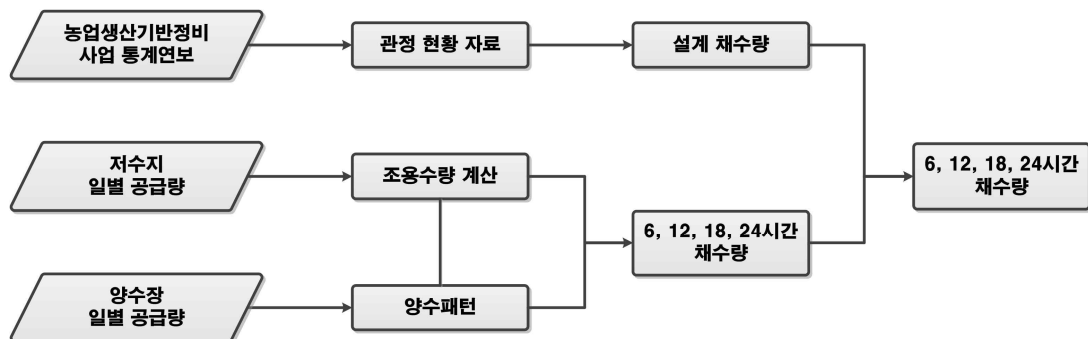


(그림 3-3-19) 취입보 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)

③ 관정 공급량

관정은 지하수를 양수하여 농업용수로 이용하기 위한 수원공 시설로서, 일반적으로 수 ha 미만의 좁은 관개면적에 급수하며, 가뭄 등으로 인하여 지표수의 이용이 불가능한 경우에 많이 설치되고 있다. 관정에 의한 관개면적은 전체 논 면적의 2% 정도로 매우 적으나, 최근에는 시설원예단지의 용수 공급이나 가뭄대책의 일환으로 그 수가 매년 증가하는 추세에 있다. 그러므로 지하수의 관리 및 수자원의 계획, 관리를 위해서는 관정에 의한 공급량의 조사가 필요하다.

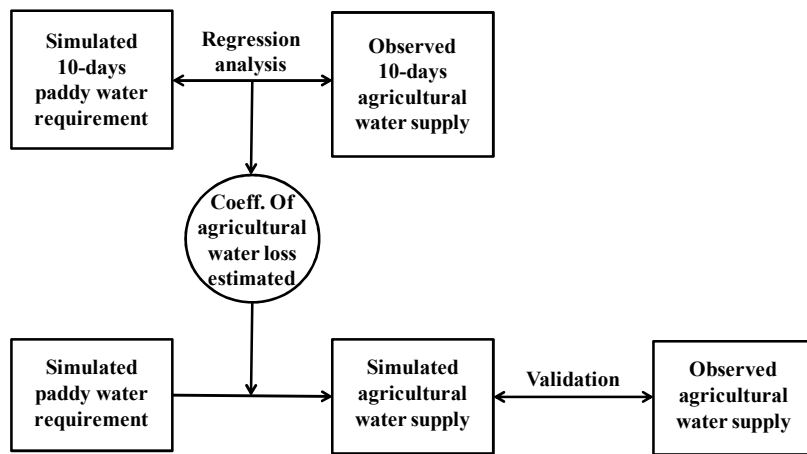
관정의 공급량 조사방법은 (그림 3-3-20)과 같다. 관정의 공급량 조사는 농업생산기반 정비사업 통계연보로부터 관정의 현황을 파악하고, 관정의 소재지와 시·군 편입률을 고려하여 소유역별, 행정구역별로 관정을 구분하였다. 관정에 의한 채수량은 관개지구의 조용수량을 충족하도록 하는 것을 원칙으로 하였으며, 이를 위하여 해당 소유역의 저수지 농업용수 자료로부터 논벼의 생육기간에 대한 공급량을 추정하였다. 끝으로, 소유역별 양수장의 급수패턴을 이용하여 6, 12, 18, 24시간 단위로 일별 채수량을 산정하였으며, 일별 채수량이 설계 채수량을 초과하지 않도록 가동시간을 조정한다 (임상준 등, 2000).



(그림 3-3-20) 관정 공급량 산정 방식 (임상준 등, 2000)

나. 복합영농 관개지구 배수량 모형의 적용성 평가방법

농업용수 공급량을 모의하기 위해서는 수리시설물의 시설관리 손실률이 필요하다. 본 연구에서는 (그림 3-3-21)과 같이 농업용수 공급량 모형에서 모의한 필요수량과 실제 농업용수 공급량을 회귀분석(regression analysis)하여 시설관리 손실률 (1-관개효율)을 추정하고, 회귀분석에 이용되지 않는 자료기간에 대해 시설관리 손실률 추정치를 적용하여 검정을 실시하였다. 회귀분석은 특정 변수 값의 변화와 다른 변수 값의 변화가 가지는 수학적 선형의 함수식을 파악함으로써 상호관계를 추론하는 통계 방법이다. 수리시설물 운영의 인위성을 고려하여 일별 자료를 순별로 합하여 회귀 분석을 실시하였다. 영농 자료는 대상 지구의 영농 현황 자료를 이용하였다. 저수지에서 공급을 중단하는 시기는 해마다 조금씩 달랐으며, 강우가 내리지 않으며 농업용수 공급이 5일 이상 중단되는 시기를 당해의 중간낙수 시기로 결정하였다.



(그림 3-3-21) 시설관리 손실률의 추정방법 (송정현, 2013)

본 연구에서 개발한 모형의 광역 논 배수량 관련 주요 매개변수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 선정된 매개변수는 <표 3-3-12>와 같이 침투량(INF), 용수로 배수량의 비율(RICD), 송수 손실률(RCL), 물꼬 높이(LH)이다. 각 매개변수의 최솟값과 최댓값은 선행연구 자료를 참고하여 결정하였으며, 최댓값과 최솟값을 기준으로 매개변수값을 무차원화하여 구분한 등급에 대하여 모형을 구동하여 민감도를 분석하였다.

<표 3-3-12> 관개지구 배수량 모형의 매개변수 범위

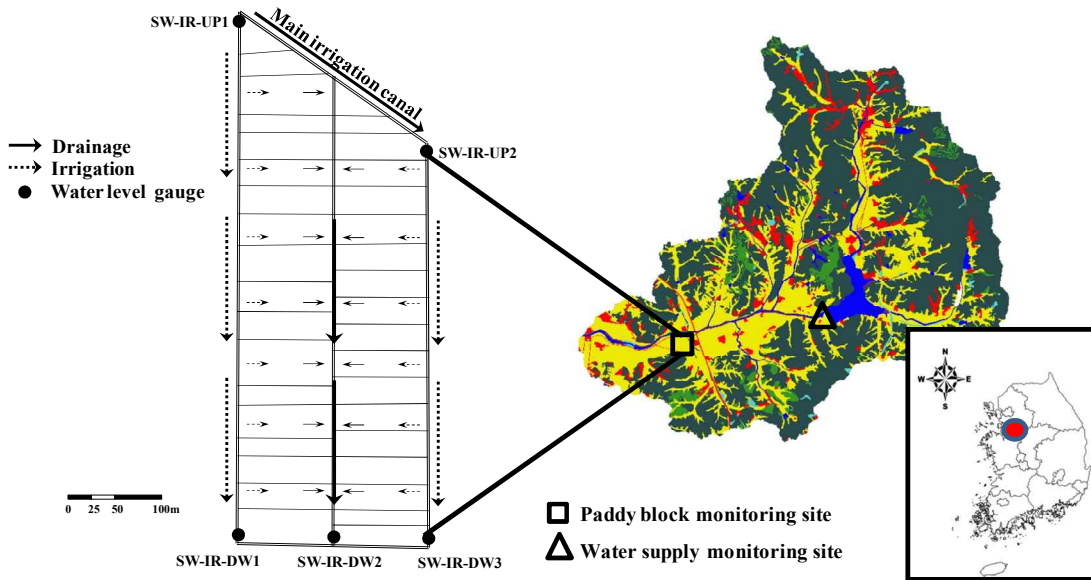
Parameters	INF (mm)	LH (mm)	RICD (%)	RCL (%)
Min.	1	50	10	5
Max.	8.8	150	50	20

4.2. 대상지구 및 자료 구축

본 연구에서는 대상지구로 경기도 용인시와 평택시 일대의 이동저수지 용남관개지구

를 선정하였다. 용남관개지구는 이동저수지를 주수원공으로 하여 농업용수를 공급받고 있다. 관개지구의 전체 면적은 2,063 ha이며, 논은 1,789.7 ha로 86.8%를 차지하고 있으며, 시설재배지는 273.3 ha로 13.2%를 차지한다. 용남관개지구는 경지정리가 시행되어 구획정리 및 용·배수로가 체계적으로 정비되어 있다.

대상지구는 (그림 3-3-22)와 같이 서울대학교 지역시스템공학과에서 10.3 ha의 광역논에 대해 수문·수질 모니터링을 실시하고 있으며, 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 이동저수지 저수위, 간선수로 및 지선수로 수위 등을 측정하고 있다.



(그림 3-3-22) 복합영농 관개지구 수문해석 모형의 적용 대상지구

가. 기상자료

대상지구의 일별 강우량과 기상자료 조사를 위하여 용남관개지구 내에 위치한 남사면 농가 옥상에 Dalotech사의 HOB0 Data Logging Rain Gauge와 Spectrum Technologies, Inc.사의 Wathchdog Weather Station을 설치하였다. 과거자료와 결측기간에 대한 자료의 보완은 대상지구로부터 약 20 km 북서쪽에 위치한 수원 기상대의 관측자료를 이용하였다.

<표 3-3-13>, <표 3-3-14>는 대상지구에 대한 2011년과 2012년의 강우량, 평균기온, 풍속, 상대습도, 일사량을 정리한 것이다. 강우량은 유출량을 추정하는데 이용하였고, 그 외 기상자료는 증발산량을 산정하는데 이용하였다.

영농기간인 4~9월의 전체 강우량은 2011년에 1,552.4 mm이었으며, 2012년의 경우 1,482.3 mm으로 1981~2010년의 평균인 1,093.1 mm와 비교하여 많은 강우량을 보였다. 특히, 홍수기인 7, 8월의 강우량이 50%이상을 차지하였다.

일사량은 4~6월에 큰 값을 보였으며, 5월에 가장 큰 값을 나타내었다. 4~9월의 일사량의 합은 2011년에 2,809.2 MJ/m²이며, 2012년에 3,119.0 MJ/m²으로 2012년에 더 크게 나타났다.

<표 3-3-13> 대상지구의 기상자료 (2011)

연도	월	강우량 (mm)	평균온도 (°C)	평균풍속 (m/s)	상대습도 (%)	일사량 (MJ/m ²)
2011	Jan.	1.2	-8.9	3.0	58.0	280.4
	Feb.	49.8	-0.5	2.1	64.1	311.8
	Mar.	35.6	2.5	5.2	62.4	487.3
	Apr.	145.2	9.3	4.5	68.8	517.6
	May.	108.8	17.2	3.7	71.3	555.8
	Jun.	291.8	21.1	1.9	73.0	492.7
	Jul.	644.2	25.2	1.9	87.3	414.8
	Aug.	307	26.1	1.8	87.7	378.9
	Sep.	55.4	21.7	1.7	71.3	449.4
	Oct.	38.4	13.9	1.1	69.9	360.0
	Nov.	46.3	11.2	1.6	71.2	221.6
	Dec.	12.4	-0.43	1.6	62.6	235.5

<표 3-3-14> 대상지구의 기상자료 (2012)

연도	월	강우량 (mm)	평균온도 (°C)	평균풍속 (m/s)	상대습도 (%)	일사량 (MJ/m ²)
2012	Jan.	9.9	-2.7	1.5	62.6	258.8
	Feb.	0.7	-1.9	1.8	55.4	363.9
	Mar.	43.1	5.1	2.3	64.4	411.8
	Apr.	125.5	12.1	2.2	65.8	513.2
	May.	16.5	19.1	1.6	63.2	640.7
	Jun.	100.8	23.6	2.1	67.3	627.3
	Jul.	572.3	25.5	1.8	82.4	487.7
	Aug.	426.2	27.3	2.3	77.8	438.8
	Sep.	241	20.8	1.5	77.1	411.3
	Oct.	96.6	15.1	1.3	71.6	395.3

나. 저수지 농업용수 공급량

용남관개지구 이동저수지의 농업용수 공급량을 조사하기 위하여, 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 측정하는 간선수로 시작지점의 시간별 수위 자료를 이용하였다. 일별 농업용수 공급량을 산정하기 위하여 수위-유량 관계를 이용하였으며, 수위-유량 관계 곡선은 (그림 3-3-23)과 <표 3-3-15>와 같다. 이동저수지의 관개지구의 농업용수 공급량을 연도별로 합하여 정리하면 <표 3-3-16>과 같다.

저수지 물 관리 현황을 살펴보면 (그림 3-3-24), (그림 3-3-25)와 같이, 관개용 저수지의 일반적인 관개 형태를 나타내고 있다.

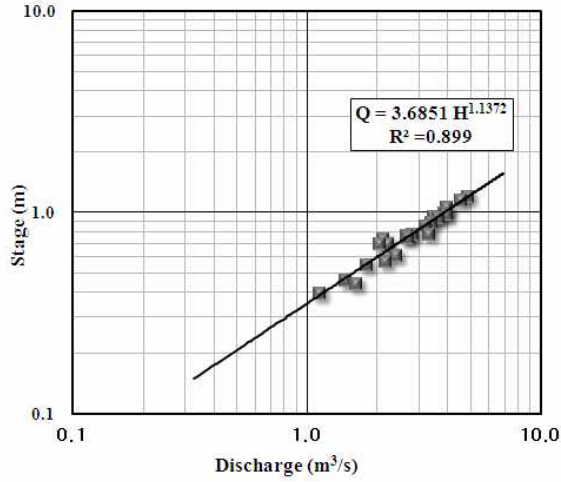
<표 3-3-15> 이동저수지 간선수로의 수위-유량 관계식

Station	Period	Raging Curve	R ²
Idong	2001~2011	$Q=3.6851 \times h^{1.1372}$	0.899

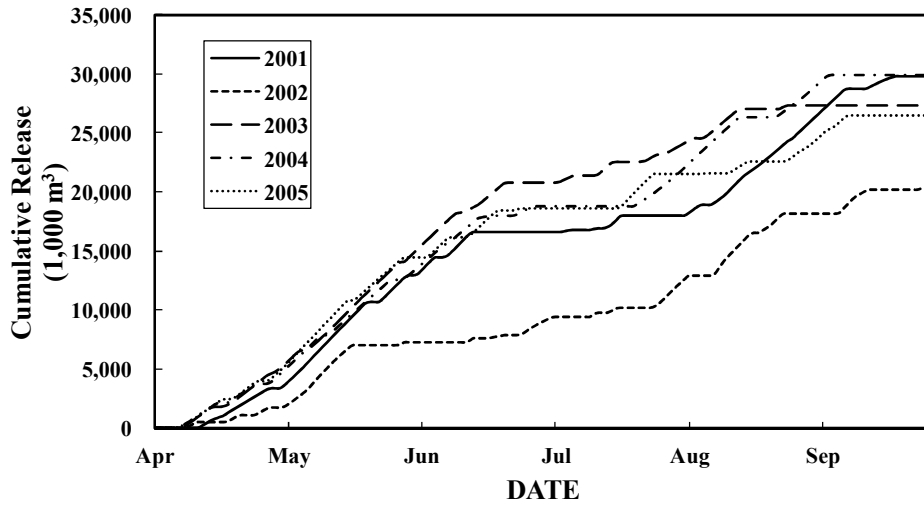
Q : Discharge (m³/s), h : Stage (m)

<표 3-3-16> 이동저수지의 농업용수 공급량 (2001~2009)

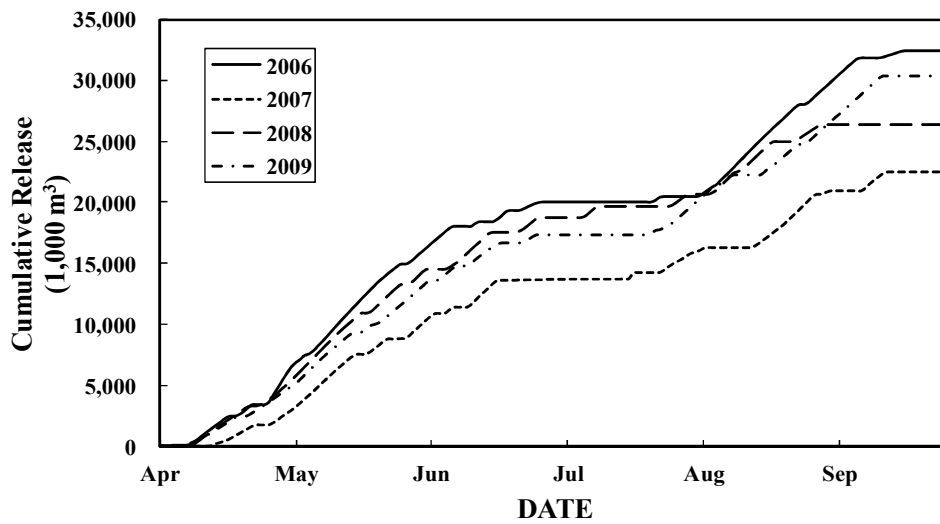
Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Water supply (mm)	1,715.1	1,172.4	1,525.7	1,670.6	1,476.4	1,848.6	1,311.8	1,475.3	1,745.8



(그림 3-3-23) 이동저수지 간선수로의 수위-유량 관계식



(그림 3-3-24) 이동저수지의 농업용수 공급량 (2001~2005)



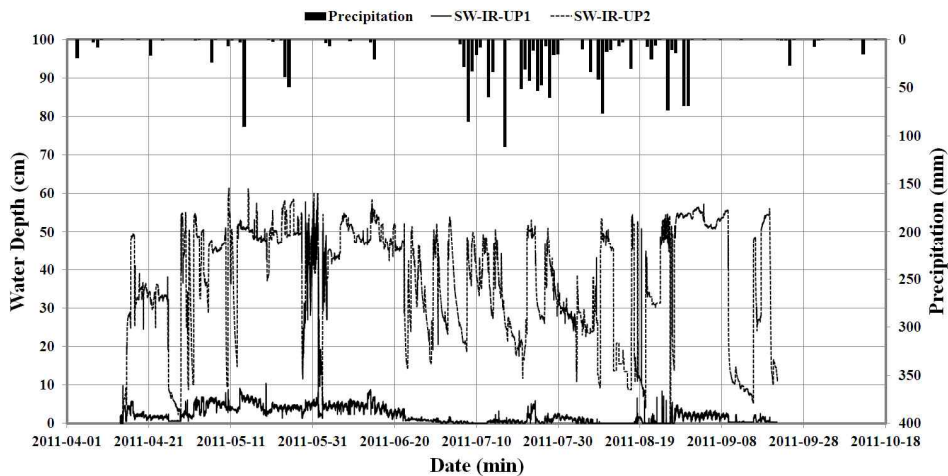
(그림 3-3-25) 이동저수지의 농업용수 공급량 (2006~2009)

다. 광역 논 수문 자료

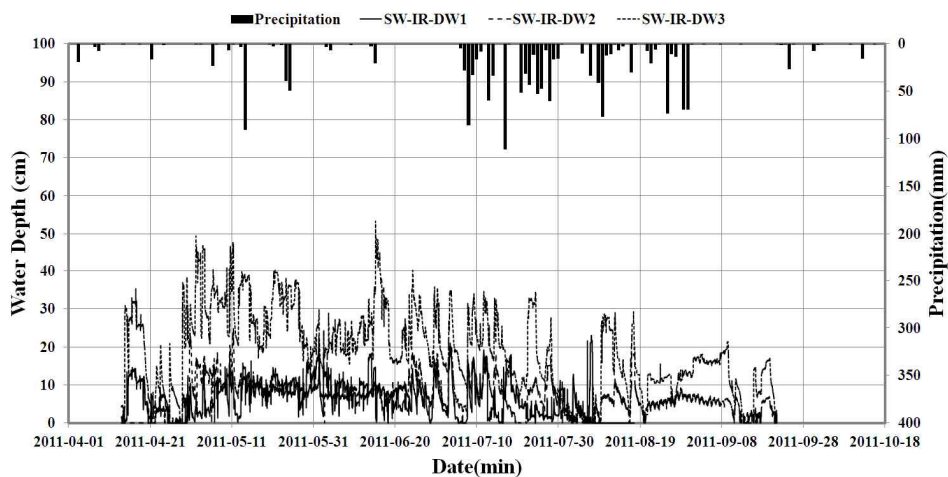
본 연구에서 개발한 모형의 광역 논에 대한 적용성을 검토하기 위하여, 용남관개지구에 위치한 광역 논을 시험지구로 선정하여 용수량 및 배수량 수문 모니터링을 수행하였다. 시험지구의 논 면적은 10.3 ha로 단일 토지이용이며, 용·배수로가 분리되어 있다. 시험지구의 용수로는 폭 60 cm의 콘크리트 수로이고 배수로는 2011년까지 흙수로였으나 2012년부터 폭 90 cm의 콘크리트 수로로 라이닝이 되어있다.

관개용수는 용수간선에서 분지되어 2개의 분수문으로부터 시험지구로 유입되어 용수로 따라 포장으로 관개되거나 말단부에서 하천으로 배수된다. 시험지구의 포장 배수량은 포장에서 물꼬를 월류하여 1개의 배수로를 통해 하천으로 배수된다.

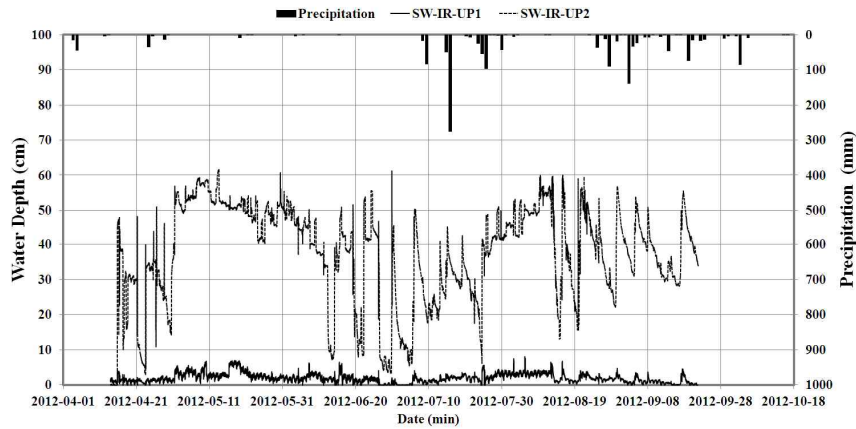
시험지구의 농업용수 공급량, 용수로 배수량, 포장 배수량을 측정하였다. 농업용수 공급량과 용수로 배수량을 측정하기 위하여 각 용수로의 시점부와 말단부에 초음파 수위계를 설치하여 시간별 수위를 관측하였다. 또한, 논 포장 배수량을 측정하기 위하여 배수로의 말단부에 초음파 수위계를 설치하여 시간별 수위를 관측하였다. (그림 3-3-26) - (그림 3-3-29)는 2011년과 2012년의 각 수로별 수위를 도시하여 보여주고 있다.



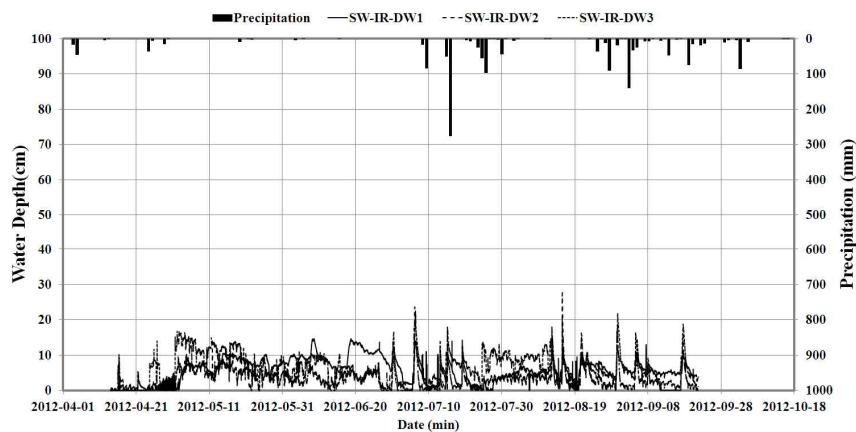
(그림 3-3-26) 용배수로의 수위 (UP1, UP2, 2011)



(그림 3-3-27) 용배수로의 수위 (DW1, DW2, DW3, 2011)



(그림 3-3-28) 용배수로의 수위 (UP1, UP2, 2012)



(그림 3-3-29) 용배수로의 수위 (DW1, DW2, DW3, 2012)

수위를 유량으로 환산하기 위하여 영농기에 용·배수로 유속을 정기적으로 조사하였다. 용·배수로의 단면을 조사하여 유속을 유량으로 환산하였으며, 초음파 수위계의 수위와 유량을 통해 수위-유량 관계곡선을 작성하였다. <표 3-3-17>은 모니터링 지구 용·배수로의 수위-유량관계를 보여주고 있다. SW-IR-DW#2는 배수로의 말단으로 2012년 초에 흙 수로에서 콘크리트로 라이닝 수로로 변하여, 2011년과 2012년의 유황 특성이 서로 상이하므로, 2011년과 2012년에 각각 수위-유량 관계곡선을 작성하였다.

<표 3-3-17> 용배수로의 수로별 수위-유량 관계식

Station	Period	Raging Curve	R ²
SW-IR-UP#1	2011~2012	$Q=279.88 \times h^{2.6992}$	0.773
SW-IR-UP#2	2011~2012	$Q=0.1972 \times h^{2.8576}$	0.927
SW-IR-DW#1	2011~2012	$Q=0.6445 \times h^{1.6672}$	0.976
SW-IR-DW#2	2011	$Q=4.8524 \times h^{2.2491}$	0.885
	2012	$Q=5.8280 \times h^{2.0111}$	0.969
SW-IR-DW#3	2011~2012	$Q=0.0924 \times h^{2.1411}$	0.936

Q : Discharge (m³/s), h : Stage (m)

수위-유량 관계곡선을 통해 농업용수 공급량, 용수로 배수량, 논 포장 배수량을 산정 후 2011년과 2012년의 영농기에 대해 정리하면 <표 3-3-18>, <표 3-3-19>와 같다. 관개량은 농업용수 공급량과 용수로 배수량의 차로부터 구하였고, 광역 배수량은 용수로 배수량과 포장 배수량의 합으로 산정하였다.

<표 3-3-18> 광역 논 수문 자료 (2011)

Date		¹⁾ WU (mm)	²⁾ DMWR (mm)	³⁾ DR (mm)	⁴⁾ IR (mm)	⁵⁾ TD (mm)	DMWR/W U
May.	F	327.0	69.2	428.2	257.8	497.3	21.2%
	M	305.8	76.0	271.0	229.8	347.0	24.9%
	L	334.2	100.2	180.5	234	280.7	30.0%
Jun.	F	243.3	62.4	125.7	180.9	188.1	25.6%
	M	266.7	69.9	142.9	196.8	212.8	26.2%
	L	99.0	51.0	319.6	48	370.6	51.6%
Jul.	F	90.0	49.1	234.8	40.9	283.9	54.6%
	M	87.9	53.9	181.6	34	235.5	61.3%
	L	99.7	22.6	161.2	77.1	183.7	22.6%
Aug.	F	58.1	20.7	22.0	37.4	42.7	35.7%
	M	38.2	11.9	142.1	26.3	153.9	31.1%
	L	153.8	11.8	81.6	142	93.5	7.7%
Sep.	F	164.6	19.7	66.8	144.9	86.5	12.0%
	M	55.8	11.6	27.8	44.2	39.3	20.7%
Sum		2,324.1	629.9	2,385.7	1,694.2	3,015.6	27.1%

¹⁾WU: agricultural water supply, ²⁾DMWR: delivery management water requirement

³⁾DR: paddy field drainage, ⁴⁾IR: irrigation, ⁵⁾TD: total drainage

<표 3-3-19> 광역 논 수문 자료 (2012)

Date		¹⁾ WU (mm)	²⁾ DMWR (mm)	³⁾ DR (mm)	⁴⁾ IR (mm)	⁵⁾ TD (mm)	DMWR/W U
May.	F	277.4	13.7	237.4	263.6	251.1	5.0%
	M	261.2	15.9	285.9	245.3	301.8	6.1%
	L	196.2	26.4	197.2	169.8	223.6	13.4%
Jun.	F	162.5	22.3	102.6	140.2	124.9	13.7%
	M	109.8	29.5	101.6	80.3	131.1	26.9%
	L	61.4	10.5	169.9	50.8	180.4	17.2%
Jul.	F	34.6	7.3	208.6	27.3	215.8	21.0%
	M	91.5	26.9	137.7	64.6	164.5	29.4%
	L	136.1	27.1	63.7	109.0	90.8	19.9%
Aug.	F	244.4	15.9	63.7	228.5	79.5	6.5%
	M	148.3	19.0	197.4	129.4	216.3	12.8%
	L	135.2	15.3	191.1	119.9	206.4	11.3%
Sep.	F	82.9	7.6	130.9	75.3	138.4	9.1%
	M	66.5	2.3	177.9	64.2	180.2	3.4%
Sum		2,007.8	239.6	2,265.4	1,768.3	2,505.0	11.9%

¹⁾WU: agricultural water supply, ²⁾DMWR: delivery management water requirement

³⁾DR: paddy field drainage, ⁴⁾IR: irrigation, ⁵⁾TD: total drainage

시험지구의 2011년 농업용수 공급량은 2,324.1 mm, 용수로 배수량은 629.9 mm로 27.1%가 관개되지 않고 하천으로 유출되는 것으로 나타났으며, 2012년은 2,007.8 mm 공급되어 11.9%인 239.6 mm가 용수로 배수량으로 배수되었다. 2012년과 2011년의 용수로 공급량의 비율의 차이가 크게 나타나는데, 이는 2012년의 경우 2011년에 비해 농업용수가 적게 공급되어, 용수를 절약하는 영농활동이 이루어졌기 때문이라고 사료된다.

총 배수량은 2011년의 경우 3,015.6 mm이었으며, 이 중 포장 배수량은 2,385.7 mm로 나타났으며, 2012년의 총 배수량은 2,505.5 mm이었으며 포장 배수량으로 2,265.4 mm가 흘러나가는 것으로 나타났다.

한편, 우리나라 관개지구에서의 배수량 모니터링 관련 선행연구를 살펴보면 윤광식 등 (2002)은 논이 95 ha, 기타 토지이용이 19.84 ha를 차지하는 양수장 관개지구를 대상으로 영농기에 대해 현장 측정하였으며, 1999년 경우 강우량 1,065 mm, 농업용수 공급량 1,340 mm에 대해 배수량이 1,453 mm으로, 2000년의 경우 강우량 1,296 mm, 농업용수 공급량 1,185 mm에 대해 배수량 1,421 mm으로 보고하였다. 오승영 등 (2002)은 41.9 ha의 하천수 관개 광역 논에 대한 현장 조사 결과, 1999년의 경우 농업용수 공급량 3,690.4 mm, 강우량 890.1 mm가 유입되어 배수량 4,055.2 mm가 흘러나가는 것으로 보고하였고, 2000년의 경우 농업용수 공급량 3,159.6 mm, 강우량 1,212.2 mm가 유입되어, 배수량 3,731.2 mm가 흘러나가는 것으로 보고하였다.

이와 같이 연도별, 지역별로 연구결과가 상이하게 나타나는데, 이는 용수원의 종류에 따라 농업용수 공급량이 다르고, 지역에 따라 침투량, 물관리 방식이 다르며, 기상조건에 따라 강우량, 증발산량이 다르기 때문이라 사료된다.

라. 영농현황

관개지구의 수문기작은 농업용수 공급량과 강우량 등의 유입량과 물꼬 높이 등의 인위적 물 관리 요소에 의해 달라진다. 중간낙수는 비담수 상태로 토양을 건조시켜 뿌리에 충분한 산소를 공급하여 무효분얼을 억제시켜 충실한 이삭을 확보하도록 하는 것으로 (정하우, 2006), 물꼬 높이를 강제로 낮추어 담수된 수량이 강제 배수되어 강우 및 관개와 관계없이 배수량이 발생하며, 이 시기에는 관개를 하지 않는 것이 일반적이다. 남원호 등 (2011)의 연구결과에 따르면 저수지 조작 운영자의 약 86%가 중간낙수를 고려하여 저수지를 운영한다고 보고되고 있다.

<표 3-3-20>은 한국농어촌공사에서 조사한 이동저수지 관개지구의 영농 현황이다. 논에서 담수는 모내기 시기보다 약 한 달 빠른 4월 13일 정도부터 시작하는 것으로 보고되고 있으며, 중간낙수는 6월 25일~7월 15일에 시행되는 것으로 보고되고 있다. 완전 낙수는 9월 중순 경에 이루어지는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 <표 3-3-20>을 바탕으로 인위적 물관리 요소의 입력 자료를 구성하였다.

<표 3-3-20> 대상지구의 영농현황

Time step	Idong
Period of nursery	4/11~5/18
Period of transplant	5/12~5/26
Period of planting water	4/13~5/18
Period of after transplant	5/27~9/11
Period of midsummer drainage	6/25~7/15

4.3. 모형의 적용성 평가

가. 농업용수 공급량 추정

(그림 3-3-30)은 2001~2009년의 순별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량의 상관관계를 보여주고 있으며, 연도별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량을 <표 3-3-21>과 같다. 실측 공급량이 가장 많았던 해는 2006년의 1,848.6 mm이며 공급량이 가장 작았던 해는 1,172.4 mm로 나타났다.

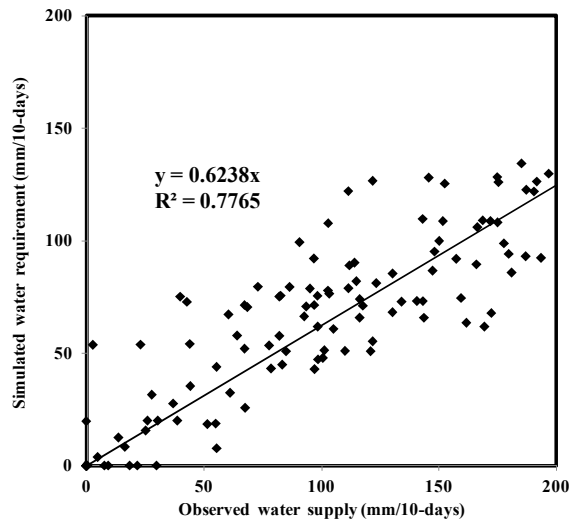
회귀분석 결과 2001~2009년에 대해 순별 모의 필요수량과 순별 실측 공급량은 0.777의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 공급량의 약 38 %가 용수로 배수량 및 송수 손실 수량으로 소모되는 것으로 나타났다. 따라서 이동저수지의 시설관리 손실률을 약 38 %로 추정할 수 있다. 우리나라는 수리시설물 설계 시 외국 자료에 근거하여 제시된 시설관리손실률인 약 15~20 %를 적용하고 있으며 (농림부, 1998), 본 연구의 추정치는 이보다 높게 나타났다.

<표 3-3-21> 연도별 모의 필요수량과 실측 농업용수 공급량

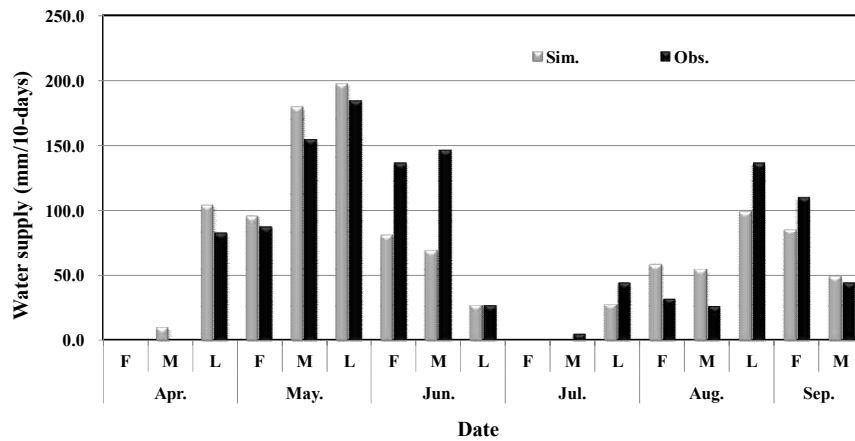
연도	강우량 (mm)	모의 필요수량 (mm)	실측 공급량 (mm)
2001	875.5	1,042.7	1,715.1
2002	1,057.8	1,095.5	1,172.4
2003	1,333.6	850.2	1,525.7
2004	1,047.5	1,033.9	1,607.6
2005	1,260.4	991.2	1,476.4
2006	1,192.8	1,034.7	1,848.6
2007	1,078.6	950.1	1,311.8
2008	1,193.2	930.0	1,475.3
2009	1,295.6	1,090.2	1,745.8

시설관리 손실률의 추정에 이용되지 않는 2011년에 대해 시설관리 손실률 추정치를 적용하여 농업용수 공급량을 모의하였고, 실측 저수지 공급량 자료와 비교하여 검정을 수행하였다. (그림 3-3-31)은 농업용수 공급량의 모의치와 실측치를 비교하여 보여주고 있다. 2011년의 모의 총 농업용수 공급량은 1,142.6 mm로 나타났고, 실측 총 농업용수 공급량은 1,218.5 mm로 나타났다. 모의 공급량은 4월 114.4 mm, 5월 473.5 mm로 실측 자료의 4월 82.2 mm, 5월 425.4 mm와 유사하게 나타났으며, 영농초기에 농업

용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며, 실측치는 50.6 mm, 모의치는 27.7 mm가 공급되는 것으로 나타났다. 강우가 집중되는 시기인 7월 하순~8월 중순까지의 모의치와 실측치는 모두 다른 시기에 비해 적게 공급되는 것으로 나타났다. 8월 하순부터 9월 초순까지는 80 mm 이상이 공급되는 것으로 나타났다. 검정 기간에 대해 순별 모의치와 실측치는 R^2 는 0.745의 관계가 있는 것으로 나타났다.



(그림 3-3-30) 순별 모의 필요수량과 농업용수 공급량의 상관관계



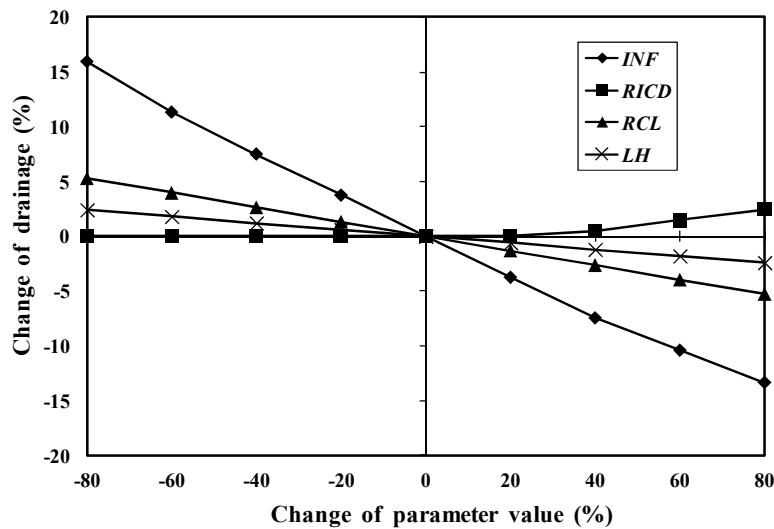
(그림 3-3-31) 농업용수 공급량의 모의치와 실측치의 비교

나. 논 광역 배수량 추정

(1) 광역 배수량 모형의 민감도 분석

(그림 3-3-32)는 2011년도 기상자료를 이용하여 논 광역 배수량 관련 주요 매개변수의 민감도 분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 민감도 분석 결과, 배수량은 논의 침투량, 송수 손실률, 물꼬 높이, 용수로 배수량의 비율 순으로 큰 변화를 나타내었다. 논

침투량 매개변수는 토양조건이나 토층 구조, 경지의 고저차, 지질 등에 따라 큰 차이가 있으므로 계측에 의해 선정하는 것이 우선이다 (임상준, 2000). 침투량 미계측 지역의 경우, 토양 조건이 비슷한 선행연구의 관측 자료를 참고하여 매개변수를 선정할 수 있을 것이라 사료된다. 용수로 배수량의 비율 매개변수는 -100 ~ 20 % 범위에서 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 변하지 않았으며, 40 ~ 100 % 범위에서 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 -100 ~ 20 % 범위에서는 용수로 배수량 비율이 감소함에 따라 증가하는 관개량이 논의 저류, 침투, 증발산으로 소모되지 않고 전량 물꼬를 넘어 배수되기 때문이다. 물꼬 높이와 송수 손실률은 매개변수가 증가함에 따라 배수량이 감소하는 것으로 나타났다. 2011년의 경우 강우량이 많은 해로, 강우량이 적은 경우 물꼬에 의한 논의 저수율이 증가하여 물꼬 매개변수에 의해 배수량이 더 민감하게 변할 것이라 사료된다 (Kim et al., 2007; 송정현 등, 2012).



(그림 3-3-32) 입력 매개변수의 민감도 분석

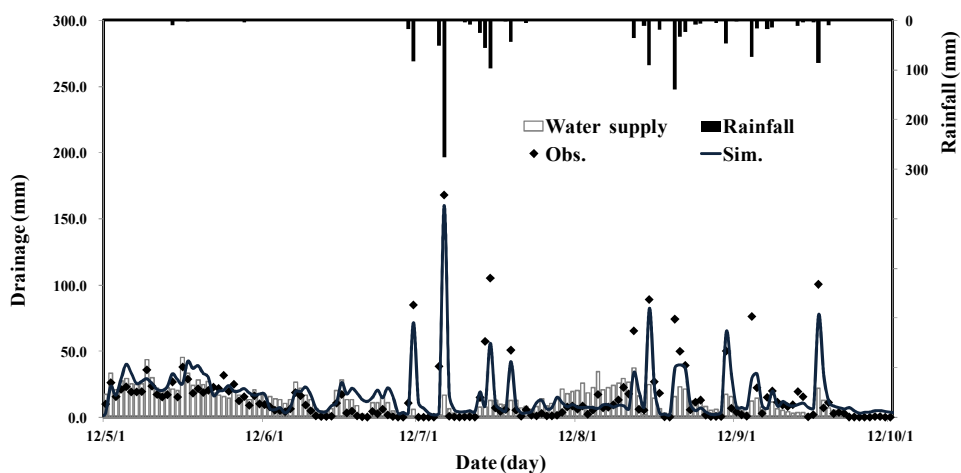
(2) 광역 배수량 모형의 보정

모형의 보정 및 검정을 위해 서울대학교 지역시스템공학과에서 모니터링하는 논 지구의 배수량 자료를 이용하였다. 농업용수 공급량은 실측치를 이용하였고, 용수로 배수량의 비율(RICD)은 시험지구의 실측 자료인 2011년 27.1 %, 2012년 11.9 %를 이용하였다. 중간낙수 시기는 시험지구의 영농 자료를 이용하여 2011년은 6/24~7/1로, 2012년은 6/17~6/24을 적용하였다.

매개변수 보정은 2012년의 관측기간에 대해 수행하였으며, 침투량 INF, 송수 손실률 RCL, 물꼬 높이 LH를 조정하였다. <표 3-3-22>는 대상지구의 배수량에 대한 매개변수의 보정결과이다. (그림 3-3-33)은 보정기간인 2012년에 대하여 강우량과 관개량에 따른 배수량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다.

<표 3-3-23>은 배수량 모의 결과와 통계적인 변량을 이용하여 모형을 평가한 결과를 나타내고 있다. 2012년의 5월 1일부터 9월 20일까지의 총 강우량은 1,354.8 mm, 총 농업용수 공급량은 2,008.0 mm였고, 자료기간에 대한 실측 총 배수량은 2,504.8 mm로

나타났다. 모형에 의한 총 배수량은 2,285.4 mm로 모의 되었다. 모형의 보정에 사용된 자료기간에 대하여 관측치와 모의치의 RMSE는 11.11 mm/day로 나타났다. RMSE는 관측치와 모의치의 오차를 정량적으로 나타내는 지표로, 오차의 편차가 심할수록 그 값이 커진다. 관측치와 모의치의 상관관계(R^2)는 0.75로 나타났으며, 모형의 효율지수(NSE)는 0.74의 값을 보였다. NSE는 0보다 작으면 모형의 추정 결과가 나쁘거나 실측 자료가 일관성이 없음을 의미하며, 0과 1 사이에서 1에 가까울수록 모의치와 관측치가 일치함을 의미한다. 모형의 보정 전과 비교하여 보정 후는 비강우시 관계에 의한 회귀수량 모의가 잘 이루어지는 것으로 나타났으며, 총 배수량의 모의치와 실측치의 차가 줄어드는 것으로 나타났다. 또한, RMSE가 감소하였고, R^2 와 NSE가 증가하여, 보정 전에 비해 모의치가 실측치를 전체적으로 잘 반영하는 것으로 나타났다.



(그림 3-3-33) 보정기간에 대한 모의치와 실측치의 비교

<표 3-3-22> 논 광역 배수량 모형의 보정 매개변수

Parameters	Definition	Initial Value	Final Value
INF	Infiltration of paddy block (mm)	3.5	1.1
LH	Paddy levee height (mm)	100	60
RCL	Ratio of conveyance loss (%)	12.5	5
RICD	Ratio of irrigation canal drainage (%)	2011: 27.1, 2012: 11.9 (Observed)	

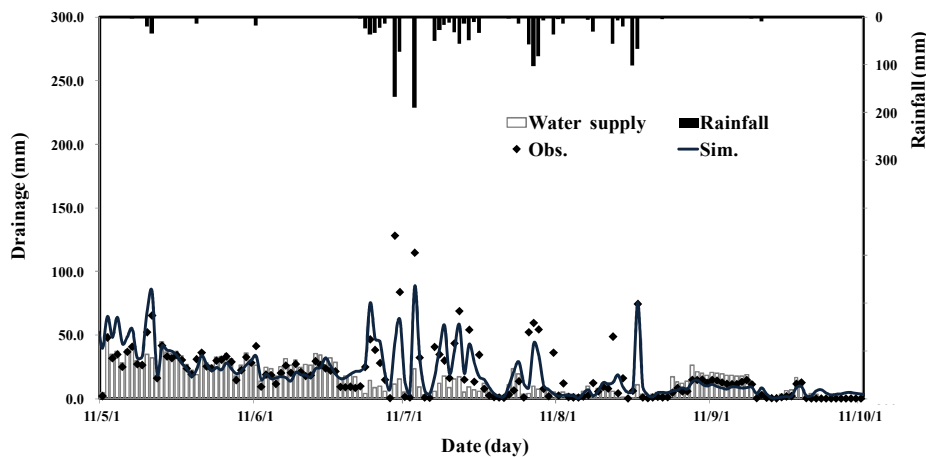
<표 3-3-23> 보정기간에 대한 모형의 통계적 평가 결과

Date	Rainfall (mm)	Water supply (mm)	Drainage (mm)		RMSE (mm/day)	R^2	NSE
			Obs.	Sim.			
2012	May.	734.8	776.5	633.0	11.11	0.75	0.74
	Jun.	333.7	436.4	237.7			
	Jul.	262.2	471.1	494.6			
	Aug.	527.9	502.2	580.8			
	Sep.	149.4	318.6	339.3			
Total	1,354.8	2,008.0	2,504.8	2,285.4			

(3) 광역 배수량 모형의 검정

모형의 검정은 모형의 보정에 이용되지 않은 2011년 자료에 대하여 수행하였다. (그림 3-3-34)는 검정기간인 2011년에 대하여 강우량과 관개량에 따른 배수량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다. <표 3-3-24>는 통계적인 변량을 이용하여 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 나타내고 있다. 자료기간의 총 강우량은 1,591.4 mm, 총 농업용수 공급량은 2,324.1 mm였고, 자료기간에 대한 실측 총 배수량은 3,015.5 mm였다. 모형에 의한 모의 총 배수량은 2,922.2 mm로 나타났다. 모형의 보정에 사용된 자료기간에 대하여 RMSE는 11.62 mm/day, R²는 0.65, NSE는 0.68의 값을 보였다. 모형의 검정 결과는 보정 결과와 비교하여 총 배수량의 모의치와 실측치가 더 유사하게 나타났다. 통계적인 변량은 RMSE가 0.51 mm/day 높게 나타났고, R²가 0.11, NSE가 0.06만큼 낮게 나타나 보정 결과가 검정에 비해 더 나은 것으로 나타났다.

한편, 보정 및 검정기간에 대해 영농초기인 5, 6월은 강우량이 상대적으로 적음에도 배수량이 높게 나타나는데, 이는 5, 6월의 경우 농업용수 공급량이 집중되어 (2011년 1,212.9 mm, 2012년 1,896.5) 관개회귀수량으로 배수되는 수량이 많기 때문으로 사료된다. 배수량 측정에 관한 선행연구를 살펴보면 Oh et al. (2002)은 하천수 관개 광역 논에 대해 1999년의 5, 6월에 강우량 293.5 mm, 공급량 1,833.3 mm가 유입될 때 1,904.2 mm가 배수되는 것으로, 2000년의 5, 6월에 강우량 233.4 mm, 공급량 1,760.0 mm가 유입되어 1,628.6 mm가 배수되는 것으로 보고하는 등 영농초기의 배수량은 강우가 아닌 공급량이 원인으로 사료된다.



(그림 3-3-34) 검정기간에 대한 모의치와 실측치의 비교

<표 3-3-24> 검정기간에 대한 모형의 통계적 평가 결과

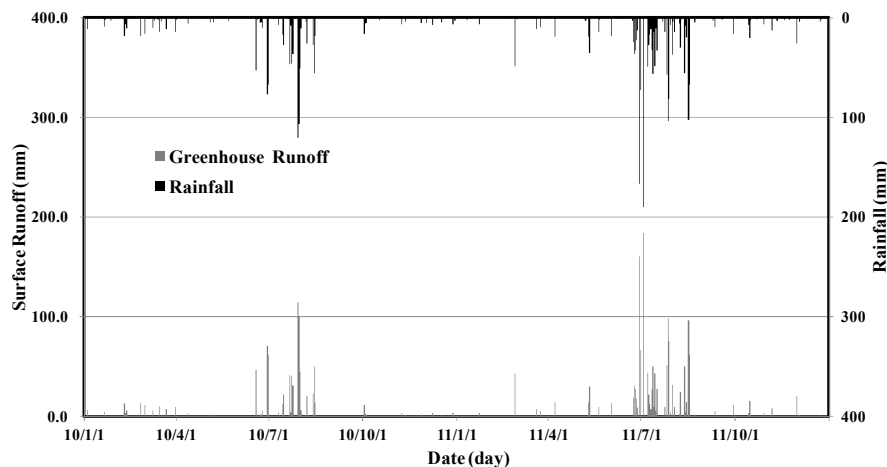
Date	Rainfall (mm)	Water supply (mm)	Drainage (mm)		RMSE (mm/day)	R ²	NSE
			Obs.	Sim.			
2011	May.	74.2	967.0	1125.0	11.62	0.65	0.68
	Jun.	391.5	609.0	771.5			
	Jul.	794.3	277.6	703.1			
	Aug.	315.1	250.1	290.1			
	Sep.	16.3	220.4	125.8			
Total	1,591.4	2,324.1	3,015.5	2,922.2			

(4) 시설재배지 유출량 추정

시설재배지 유출량 모형을 이용하여 2010~2011년의 시설재배지에서의 배수량을 추정하였다. <표 3-3-25>와 (그림 3-3-35)는 모의 기간에 대해 유출량과 강우량을 보여주고 있다. 모의 유출량은 2010년의 강우량 1,100.4 mm에 대해 77%인 846.0 mm로 나타났고, 2011년의 강우량 1,809.6 mm에 대해 83%인 1,507.4 mm로 나타났다. 전체 모의 기간에 대해 총 강우량은 2,910.0 mm, 모의 총 유출량은 2,353.4 mm였고, 평균 유출률은 0.81으로 나타났다.

<표 3-3-25> 시설재배지 유출량 모형의 모의 결과 (2010~2011)

연도	강우량 (mm)	모의 시설재배지 유출량 (mm)	유출률
2010	1,100.4	846.0	0.77
2011	1,809.6	1,507.4	0.83
Total	2,910.0	2,353.4	0.81

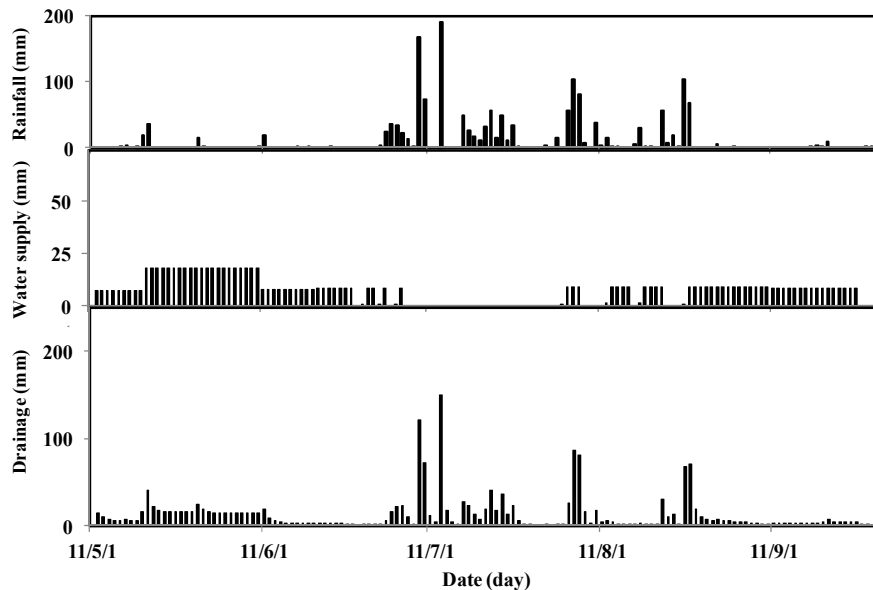


(그림 3-3-35) 시설재배지 유출량 모형의 모의 결과 (2010~2011)

다.복합영농 관개지구 배수량 추정

본 연구에서는 복합영농 관개지구 배수량 모의 모형을 이용하여 이동저수지 관개지구의 2011년도 영농기의 물수지를 분석하였다. 상류 논외의 배수량이 하류 논외의 관개량으로 반복 이용되는 경우는 고려하지 않았다. 모형의 매개변수인 침투량, 송수 손실률 그리고 물꼬 높이는 각각 1.1 mm/day, 5 %, 60 mm로 모형의 보정치를 이용하였으며, 용수로 배수량의 비율 값은 2011년의 실측치인 27.1 %를 이용하였다. 물수지 분석 결과를 순별로 정리하면 <표 3-3-26>과 같고, (그림 3-3-36)은 주요 수문인자인 강우량, 공급량, 배수량을 일별로 보여주고 있다. 관개지구로 유입되는 수량은 강우량 1,591.4 mm, 농업용수 공급량 1,028.2 mm로 총 2,691.6 mm인 것으로 나타났다. 논, 시설재배지, 용수로에서 배출되는 총 배수량은 1,890.8 mm, 수로에서 손실되는 수량은

51.6 mm, 논의 침투로 손실되는 수량은 132.0 mm, 증발산량은 570.3 mm로 총 2,644.6 mm가 관개지구에서 빠져나가는 것으로 분석되었다. 농업용수 공급량은 유효우량에 의해 최대담수심 이상으로 관개되는 시기와 중간낙수기에 공급이 되지 않는 것으로 모의되었다. 논 침투량은 비교적 낮은 값으로 나타나는데, 이는 대상지구의 논 토양 종류가 Clay loam으로 점토 성분이 타 지역에 비해 상대적으로 많기 때문으로 사료된다. 침투량 측정 선행 연구에 의하면 Hwang et al. (2002)은 논 토양 종류가 Clay loam인 지역에 대해 5월 중순~8월 하순의 침투량은 78 mm로, Oh et al. (2002)는 토양 종류가 loam인 광역 논에 대해 5월~9월의 침투량이 147.4 mm로 보고하는 등 본 연구와 비슷하게 작은 수치를 보이고 있다. 배수량은 5월에 491.5 mm로 크게 나타나는데 이는 영농초기에 농업용수 공급량이 많이 유입되어 관개회귀수량으로 배수되었기 때문으로, 5월 이후 6월 말~7월 말에서 크게 나타나는 것은 강우가 많이 내려 유출되었기 때문이다. 총 유입량과 총 유출량의 차가 약 25.0 mm로 나타나는데, 이는 4월에 농업용수 공급에 의해 담수된 수량이 있었기 때문으로 사료된다.



(그림 3-3-36) 대상 관개지구의 농업용수 공급량 및 배수량 모의 결과

<표 3-3-26> 대상 관개지구의 물수지 (2011)

Date	Inflow			Outflow					
	Rain. (mm)	Water supply (mm)	sum	Drain.	Conv. loss	Infilt.	Evap.	sum	
2011	May.	74.2	473.5	547.7	491.5	23.7	34.1	23.4	572.7
	Jun.	391.5	177.6	569.1	355.2	8.9	25.3	179.7	569.1
	Jul.	794.3	27.7	822.0	660.9	1.4	27.5	132.2	822.0
	Aug.	315.1	213.7	528.8	317.3	10.8	25.3	175.5	528.8
	Sep.	16.3	135.7	152.0	65.9	6.8	19.8	59.5	152.0
Total	1,591.4	1,028.2	2,619.6	1,890.8	51.6	132.0	570.3	2,644.6	

Rain.: Rainfall, Drain.: Drainage, Conv.: Conveyance
 Infilt.: Infiltration, Evap.: Evapotranspiration

5. 관개지구 회귀 특성 분석

관개회귀수량은 농업구역의 하천 유량을 구성하는 중요한 성분으로 취수시설의 설계와 관개조직의 운영, 용수수급계획, 하천 유황의 예측, 환경용수 방류량의 결정, 그리고 농업비점오염원 관리 등 유역 수자원관리에 있어 중요한 요소로 작용한다 (임상준, 2000; Causape et al., 2006; Lin and Garcia, 2012; Poch-massegu et al., 2014). 하지만, 관개회귀수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이, 담수심 관리 방식 등 인위적 요소의 영향을 동시에 받기 때문에 그 기작이 복잡한 특성을 가진다 (Gosain et al., 2005; 송정현, 2013; Masashi et al., 2014).

우리나라의 수자원장기종합계획에서는 농업용수 공급량의 약 35%가 하천으로 회귀되는 것으로 예상하고 있다 (국토해양부, 2011). 하지만, 선행연구의 조사 결과에 의하면 농업용수 회귀율은 용수 공급 현황과 물관리 방식에 따라 약 32~86%의 범위로 지역별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (임상준, 2000; 추태호, 2004a; 정상옥과 박기중, 2004; 김태철 등, 2010). 따라서, 합리적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 지역별 농업용수 공급 현황과 물관리 방식이 반영된 농업용수 회귀율이 물이용 계획에 이용될 필요가 있다.

관개회귀수량 조사에 관한 연구는 효율적인 수자원 이용의 측면에서 국내외에서 이루어져왔다. 국내에서는 관개량, 침투량, 그리고 배수량 성분의 관측 자료를 이용하여 관개회귀수량 및 회귀율을 산정하는 연구가 추태호 (2004a), 정상옥과 박기중 (2004), 그리고 김태철 등 (2010)에 의해 수행된 바 있다. 하지만, 이들 연구는 무강우시 물수지 분석을 통한 연구로 강우시 관개회귀수량에 대해서는 고려하지 않았다. 강우시 관개회귀수량 성분을 산정하기 위해서는 배수량 성분 중에서 강우에 의한 유출량 성분을 제외해야하기 때문에 배수량의 단순한 측정을 통해서 분석이 어려운 점이 있다. 그러므로 관개회귀수량 구성요소를 추정하기 위해서는 모니터링을 통한 물수지 요소의 관측과 배수량 모형을 이용한 수학적 모델링을 병행하여야 한다 (임상준, 2000; Kim et al., 2009; Chien and Fang, 2012; 송정현 등, 2013a).

5.1. 관개회귀수량 조사 방법

가. 관개회귀수량 구성요소 및 정의

(1) 관개회귀수량

관개회귀수량은 농업용수 공급량 중 작물에 의해 소모되지 않고 하천으로 유입되는 수량을 의미하며, 식 (3-3-52)와 같이 신속회귀수량 (quick return flow)과 지연회귀수량 (delayed return flow)으로 구분된다. 신속회귀수량은 용수로의 말단부에서 배수되거나 물꼬를 월류하여 짧은 지체시간에 신속히 배제되는 회귀수량을 의미하고, 지연회귀수량은 토양 중으로 침투되어 지하수로부터 유출되는 수량을 의미한다 (임상준, 2000).

$$RF = QRF + DRF \quad (3-3-52)$$

여기서, RF 는 총 회귀수량 (mm), QRF 는 신속회귀수량 (mm), 그리고 DRF 는 지연

회귀수량 (mm)을 의미한다.

(2) 신속회귀수량

신속회귀수량은 식 (3-3-53)과 같이 용수로 회귀수량 (quick return flow from irrigation canal)과 배수로 회귀수량 (quick return flow from drainage canal)으로 구분된다 (임상준, 2000; 송정현, 2013; 송정현 등, 2013a). 용수로 회귀수량과 배수로 회귀수량은 각각 공급량 중 관개되지 않고 용수로 말단부에서 회귀되는 수량과 관개된 공급량 중 물꼬를 넘어 배수로를 통해 하천으로 회귀되는 수량을 의미한다 (송정현 등, 2013a).

$$QRF = RFI + RFD \quad (3-3-53)$$

여기서, RFI 는 용수로 회귀수량 (mm), 그리고 RFD 는 배수로 회귀수량 (mm)을 의미한다.

(3) 농업용수 회귀율

농업용수 회귀율 (return flow ratio)은 농업용수 공급량에 대한 회귀수량의 비율을 의미한다 (김태철 등, 2010; Jafari et al., 2012). 용수로 회귀율, 배수로 회귀율, 그리고 자연회귀율은 각각 농업용수 공급량 중 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 자연회귀수량의 비율이다. 농업용수 회귀율은 식 (3-3-54)와 같이 용수로 회귀율, 배수로 회귀율, 그리고 자연회귀율을 합하여 산정할 수 있다.

$$R_F = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{RFI}{AWS} + \frac{RFD}{AWS} + \frac{DRF}{AWS} \quad (3-3-54)$$

여기서, R_F 는 농업용수 회귀율, R_1 는 용수로 회귀율, R_2 는 배수로 회귀율, R_3 는 자연회귀율, 그리고 AWS 는 농업용수 공급량 (mm)이다. 신속회귀율은 R_1 과 R_2 를 합하여 산정할 수 있다.

나. 관개회귀수량 산정 방법

신속회귀수량 중 용수로 회귀수량은 모니터링을 통하여 쉽게 추정할 수 있다. 그러나 배수로 회귀수량의 경우 배수량 성분 중 강우에 의한 유출 성분을 제외하여 그 성분을 산정해야하기 때문에 단순한 측정을 통해서만 정량적인 분석이 어려운 점이 있으며, 수학적 모델링을 병행하여 해석해야 한다 (임상준, 2000; Kim et al., 2009).

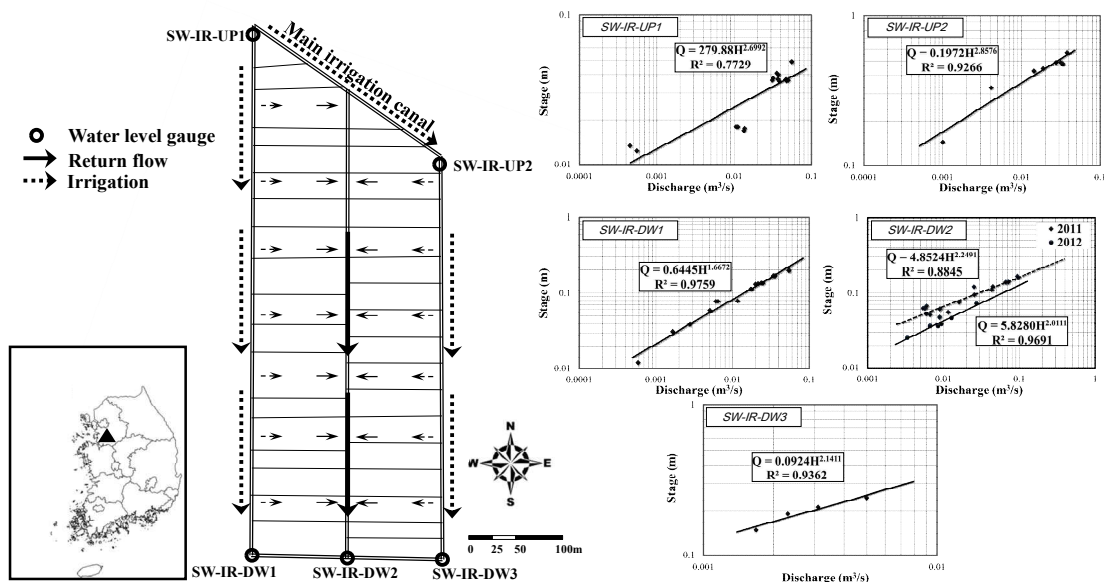
본 연구에서는 송정현 등 (2013a)이 개발한 광역 논 배수량 모형을 기반으로 임상준 (2000)이 제시한 관개회귀수량 산정을 위한 가정을 적용하여 배수로 회귀수량 성분을 추정하였다. 배수량 모형에 대한 자세한 내용은 앞에 상세히 기술되어 있으며, 임상준 (2000)이 제시한 관개회귀수량 산정을 위한 가정은 다음과 같다.

- ① 관개는 일차적으로 강우에 의해 이루어지며, 부족한 수량만을 인위적인 수단으로 공급하는 것이다. 그러므로 강우시에는 강우량이 먼저 공급되고, 그 이후에 관개량이 공급되는 것으로 계산한다.
- ② 무강우시에는 물꼬를 넘어 배수되는 수량이 전량 배수로 회귀수량이다.
- ③ 강우량에 의하여 증가된 담수심이 물꼬보다 높을 경우에는 유입되는 관개량이 전량 배수로 회귀수량이다.
- ④ 강우에 의한 담수심이 물꼬보다 낮을 경우에는 공급된 관개량으로부터 담수심을 계산하여 물꼬를 통해 배수되는 수량이 배수로 회귀수량이다.

본 연구에서는 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량의 산정은 현장 계측된 자료를 이용하였다. 추태호 (2004a), 정상옥과 박기중 (2004), 그리고 김태철 등 (2010)은 침투량이 궁극적으로 하천으로 회귀한다고 가정을 하여 침투량 관측 성분을 지연회귀수량으로 간주하고 있으며, 본 연구에서도 동일한 방법을 이용하였다.

5.2. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 경기도 용인에 이동저수지로부터 농업용수를 공급받는 10.3 ha 크기의 광역 논을 대상지구로 선정하여 모니터링을 수행하였으며, 모니터링 계측망 및 수위-유량 관계식은 (그림 3-3-37)과 같다. 대상 지구는 용·배수로가 분리되어 있으며, 용수로는 폭 60 cm의 콘크리트 수로이고 배수로는 2011년까지 흙 수로였으나 2012년부터 폭 90 cm의 콘크리트 수로로 라이닝이 되어있다. 농업용수 공급량은 용수간선에서 분지되어 2개의 분수문으로부터 시험지구로 유입되어 용수로를 따라 포장으로 관개되거나 말단부에서 하천으로 회귀되고 있다. 시험지구의 배수로 회귀수량은 포장에서 물꼬를 월류하여 1개의 배수로를 통해 하천으로 유입된다 (송정현, 2013; 송정현 등, 2013a; 송정현 등., 2013b).



(그림 3-3-37) 대상지구 모니터링 시스템 및 수위-유량 관계곡선

본 연구에서는 대상지구에 대한 송정현 등 (2013b)의 물수지 요소 관측결과와 송정현 등 (2013a)의 모델링 결과를 이용하여 관개회귀수량을 추정하였다. 본 연구 대상지에 대한 수로 수위, 농업용수 공급량, 침투량, 그리고 용수로 회귀수량 관측 결과는 송정현 등 (2013b)에 상세히 기술되어 있으며, 송정현 등 (2013a)에서는 배수량 관측 및 모의 결과, 그리고 보정 및 검정 결과의 평가 등이 상세히 기술되어 있다.

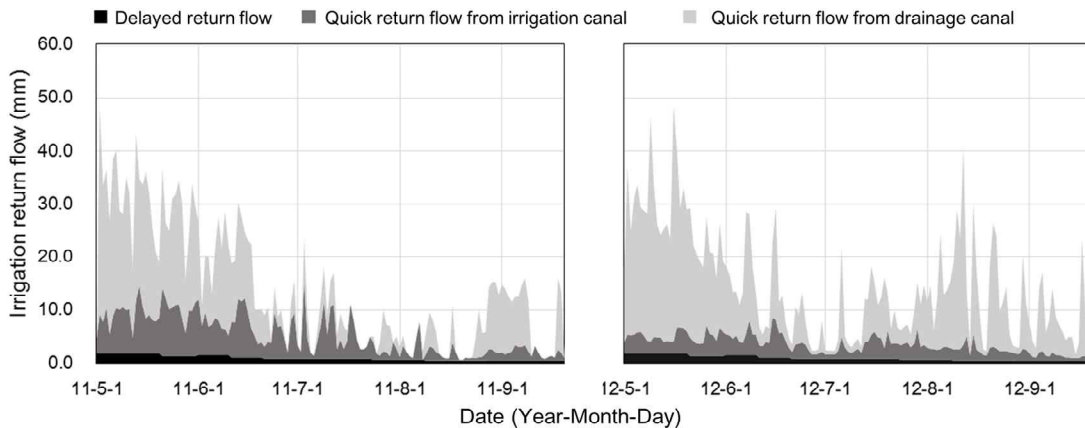
5.3. 관개회귀수량 특성분석

가. 통계분석 방법

본 연구에서는 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성성분의 시기별 특성을 분석하기 위하여 통계적 방법을 이용하였다. 농업용수 공급량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량의 일 평균값이 월별로 유의한 차이가 있는지를 분석하기 위하여 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)를 수행하였다. 사후검정 방법으로는 Duncan의 다중범위검정 (Duncan's Multiple Range Test, DMRT)을 이용하였으며, 통계적 유의수준은 p값 0.05이하로 정하여 일 평균값이 월별로 차이가 없다는 귀무가설에 대한 기각여부를 판단하였다. 또한, 본 연구에서는 농업용수 공급량과 신속회귀수량의 상관관계를 Pearson 상관분석을 통해 분석하였다. 모든 통계분석은 IBSS SPSS Statistics 21 (SPSS, Inc., 2012)를 이용하였다.

나. 관개회귀수량 산정

본 연구에서는 (그림 3-3-38)과 같이 관개회귀수량의 구성요소인 신속회귀수량과 지연회귀수량을 2011~2012년 영농기간에 대해 일별로 산정하였다. 신속회귀수량은 용수로 회귀수량과 배수로 회귀수량으로 구분하여 산정하였다. 대상지구의 지연회귀수량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량은 각각 $0.4\sim 1.8 \text{ mm day}^{-1}$, $0.0\sim 14.9 \text{ mm day}^{-1}$, 그리고 $0.0\sim 42.3 \text{ mm day}^{-1}$ 의 범위로 나타났으며, 총 회귀수량은 $0.6\sim 48.6 \text{ mm day}^{-1}$ 의 범위로 나타났다. <표 3-3-27>은 대상지구의 2011~2012년 영농기에 대한 월 단위 강우량, 농업용수 공급량, 관개회귀수량, 그리고 회귀율을 정리하여 보여주고 있다.



(그림 3-3-38) 대상지구 관개회귀수량 구성 요소의 일별 변화

<표 3-3-27> 대상지구 연구기간 동안의 관개회귀수량 분석 결과

기간	강우량 (mm)	농업용수 공급량 ^a (mm)	용수로 회귀수량 ^a		배수로 회귀수량 ^b		자연회귀수량 ^c		총 회귀수량		
			수량 (mm)	비율 (%)	수량 (mm)	비율 (%)	수량 (mm)	비율 (%)	수량 (mm)	비율 (%)	
2011	5월	74.2	967.0	245.4	25.4	637.4	65.9	50.1	5.2	933.0	96.5
	6월	391.5	609.0	183.3	30.1	283.4	46.5	32.7	5.4	499.4	82.0
	7월	794.3	277.6	125.5	45.2	78.6	28.3	17.6	6.3	221.7	79.9
	8월	315.1	250.0	44.4	17.8	101.8	40.7	8.9	3.6	155.2	62.1
	9월	16.3	220.5	31.2	14.2	122.6	55.6	2.1	1.0	155.9	70.7
2012	5월	16.5	734.7	56.0	7.6	592.7	80.7	50.1	6.8	698.9	95.1
	6월	100.8	333.7	62.4	18.7	128.0	38.4	32.7	9.8	223.1	66.8
	7월	572.3	262.2	61.3	23.4	77.5	29.6	22.5	8.6	161.3	61.5
	8월	426.2	527.9	50.1	9.5	304.8	57.7	15.1	2.9	370.0	70.1
	9월	239.0	149.4	9.8	6.6	117.2	78.5	8.0	5.4	135.1	90.4

a 용수로 회귀수량은 측정된 수위와 수위-유량관계곡선식으로부터 도출됨

b 배수로 회귀수량은 송정현 등 (2013a)에 의해 보정 및 검증된 모형으로부터 추정된 값임

c 침투량을 자연회귀수량으로 간주하였음

농업용수 공급량은 149.4~967.0 mm month⁻¹의 범위로 5~6월에 비교적 높게 나타났다. 다만, 2012년 8월의 경우 527.9 mm month⁻¹로 높게 나타나기도 하였다. 용수로 회귀수량은 2011년 5월에 245.4 mm month⁻¹로 가장 높았으며, 용수로 회귀율은 2011년 7월에 가장 높게 나타났다. 배수로 회귀수량과 배수로 회귀율은 각각 77.5~637.4 mm month⁻¹과 28.3~80.7%의 범위로 나타났다. 자연회귀수량은 2.1~50.1 mm month⁻¹로 나타났고, 신속회귀수량 구성성분과 비교하여 그 양이 미비하였다. 이상과 같이, 농업용수 공급량과 관개회귀수량, 그리고 농업용수 회귀율은 시기별로 편차가 큰 편이며, 회귀수량이 가장 높게 나타난 시기와 회귀율이 높게 나타난 시기가 다르기도 하였다. Kim et al. (2009)에 의하면 농업용수 회귀율은 강우량, 농업용수 공급량, 그리고 시기별 변동성 등에 의해 복합적으로 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대상 지구의 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성성분의 시기별 차이를 통계적인 방법 등을 이용하여 고찰·분석하였으며, 이는 다음 장에 상세히 서술하였다.

다. 농업용수 공급량과 관개회귀수량의 시기별 특성 분석

(1) 월별 일평균 비교

<표 3-3-28>은 2011~2012년의 농업용수 공급량, 용수로 회귀수량, 그리고 배수로 회귀수량의 일 단위 값 대해 ANOVA를 통해 월별로 비교한 결과를 보여주고 있다. 농업용수 공급량은 5월에 27.4 mm day⁻¹으로 가장 높게 나타났으며, 그 이후로 6월 > 7월 ≈ 9월 > 8월의 순으로 나타났다 ($p < 0.05$).

용수로 회귀수량은 5월과 6월에 각각 4.9mm day⁻¹, 4.1 mm day⁻¹으로 가장 높게 나타났으며, 그 이후로 7월 > 8월 ≈ 9월 순으로 나타났다 ($p < 0.05$). 용수로 회귀수량이 5월과 6월에 높게 나타난 이유는 농업용수 공급량 또한 해당 기간에 높게 나타났기 때문으로 사료된다. 하지만, 용수로 회귀율은 영농 초기가 아닌 7월에 34.6%로 가장 높게 나타났다. 용수로 회귀율이 7월에 가장 높게 나타난 원인은 7월의 강우량이 가장 높았기 때문에 (683.3 mm month⁻¹) 유효우량을 통한 관개가 충분히 이루어져 농민이 인위적인 관개를 수행할 필요성이 낮아졌으며, 관개되지 않은 수량이 하천으로 회귀되었기 때문이다. 또한, 대상 지구에서 7월 초순과 중순에 중간낙수 활동이 이루어진 점도 영향을 미쳤을 것으로 사료된다 (농업기반공사, 2005). Kim et al. (2005)은 본 연구와 같이 용수로 회귀수량과 용수로 회귀율을 5년 동안 조사하였으며, 그 결과 용수로 회귀수량과 용수로 회귀율은 모두 6월에 각각 12.4~17.1 mm day⁻¹, 55~71%로 가장 높게 나타나며, 이는 해당지구의 6월 말에 중간낙수가 실시되었기 때문으로 보고하고 있다. 중간낙수 시기에는 토양을 건조시키기 위하여 관개를 하지 않는 것이 일반적이다 (정하우 등, 2006). 이용직 등 (2008)의 용수로 회귀율 관측 결과에 따르면 양수장 지구는 37.1%, 저수지 지구는 36.2%, 지선 지구는 30.9%인 것으로 보고하고 있으며, 본 연구의 저수지 관개지구는 7월 용수로 회귀율이 이용직 등 (2008)의 저수지 지구와 비슷하게 나타났다.

배수로 회귀수량은 5월에 19.8 mm day⁻¹로 가장 높게 나타났고, 그 이후로 6월 ≈ 8월 ≈ 9월 > 7월 순으로 나타났다 ($p < 0.05$). 대상지구의 배수로 회귀율은 5월에

72.3%로 가장 높게 나타나며, 이는 5월의 공급량이 가장 높은 점과 연관이 있을 것이다. 하지만, 정상욱과 박기중 (2004)에 의하면 공급량이 6월에 가장 높았으나 배수로 회귀율은 7월에 가장 높게 나타나기도 하며 추태호 (2004a)에 의해서도 공급량이 6월에 가장 높았으나 배수로 회귀율은 9월에 가장 높게 나타나기도 하는 등, 공급량이 가장 높게 나타나는 시기에 회귀율이 가장 높게 나타는 것은 아니다. 이는 선행연구에서는 공급량이 가장 높았던 시기에 관개량 중 많은 양이 논에서 소비되어 회귀수량이 낮게 나타난 것으로 사료된다. 수원지방의 영농기 벼 필요수량이 638~740 mm의 범위로 보고되는 점을 고려하면 (Yoo et al., 2008), 본 연구에서의 5월 평균 공급량 849.4 mm month⁻¹는 필요수량을 크게 초과하는 수치였을 것으로 사료되며 이로 인해 5월의 회귀율이 가장 높게 나타났을 것이다. 7월에 배수로 회귀율이 가장 낮게 나타나는 원인은 중간낙수 시기의 영농 활동에 따라 관개가 중단되어 비교적 적은 양이 배수되었기 때문으로 사료된다.

<표 3-3-28> 관개회귀수량 구성요소의 월별 일평균 통계 비교

월	No.	강우량 (mm month ⁻¹)	공급량 (mm day ⁻¹)	용수로 회귀수량		배수로 회귀수량	
				수량 ^b (mm day ⁻¹)	비율 (%)	수량 ^b (mm day ⁻¹)	비율 (%)
May	62	45.4	27.4±1.1a*	4.9±0.5a	17.7	19.8±1.0a	72.3
Jun	60	246.2	15.7±1.2b	4.1±0.4a	26.1	6.9±0.8b	43.6
Jul	62	683.3	8.7±0.8c	3.0±0.4b	34.6	2.5±0.4c	28.9
Aug	62	370.7	12.5±1.2d	1.5±0.2c	12.1	6.6±0.9b	52.3
Sep	40	127.7	9.2±1.1c	1.0±0.1c	11.2	6.0±0.8b	64.9

b 평균 ± 표준편차

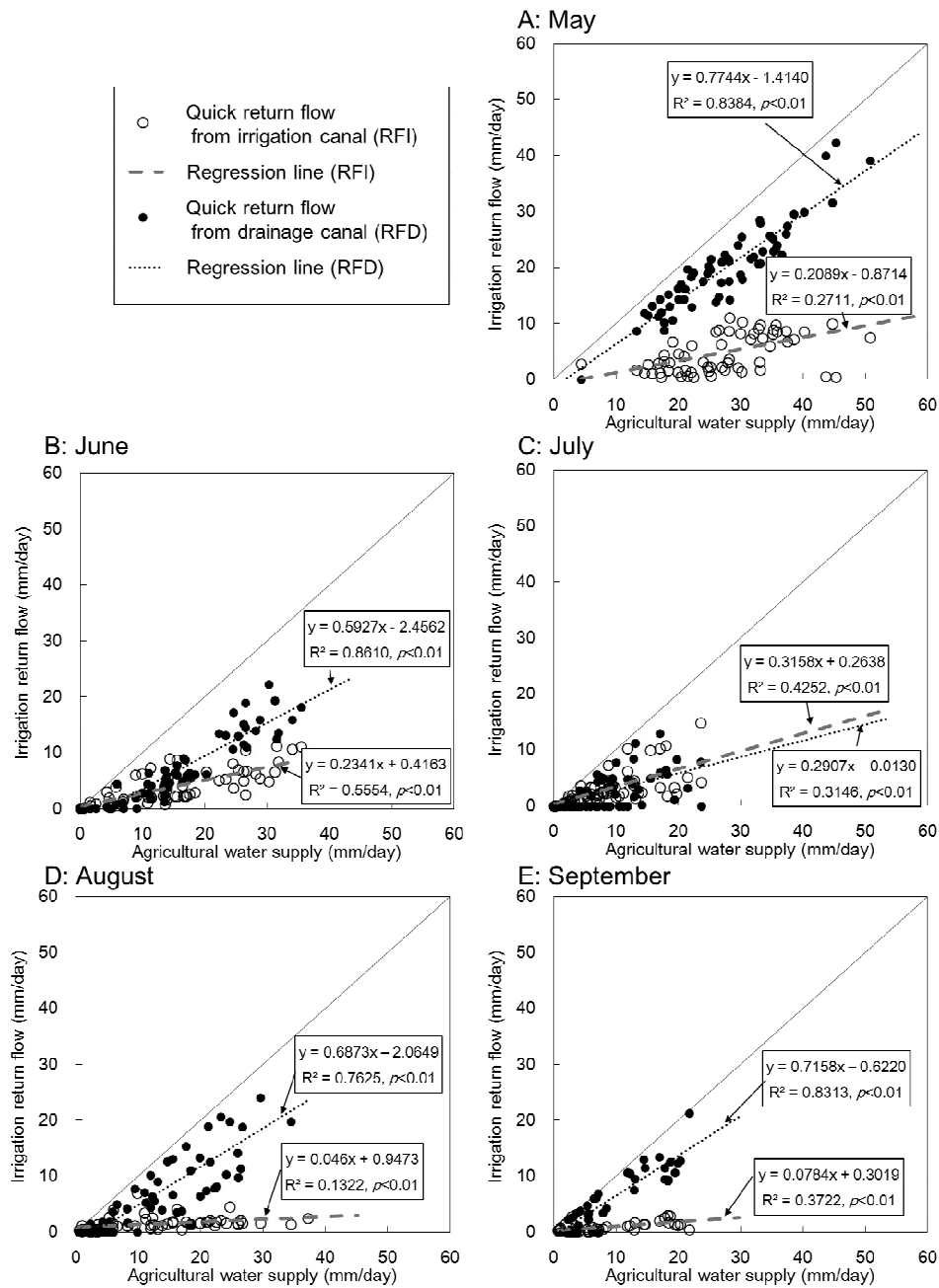
* 같은 열의 같은 문자는 Duncan's multiple range test (DMRT)를 통한 분석 결과, 평균의 유의한 차이가 없다는 것을 의미함 (p<0.05)

(2) 상관분석

본 연구에서는 농업용수 공급량과 신속회귀수량 구성성분에 대해 상관분석을 수행하였으며, 그 결과는 (그림 3-3-39)와 같다.

농업용수 공급량과 배수로 회귀수량의 상관관계가 높은 것은 충분한 관개가 이루어져 많은 수량이 물꼬를 넘어 하천으로 회귀되는 것을 의미한다. 또한, 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량 사이의 상관식의 기울기가 낮으면 공급량 중 포장으로 흘러들어가는 비율이 높은 것을 의미하고, 기울기가 높으면 상대적으로 많은 공급량이 포장으로 유입되지 않고 하천으로 회귀되는 것을 의미한다.

배수로 회귀수량은 7월을 제외하면 농업용수 공급량과 0.76~0.86의 높은 상관관계가 나타났다 (p < 0.01). 용수로 회귀수량은 농업용수 공급량과 6월과 7월에 각각 0.56과 0.42로 비교적 높은 상관관계를 보였다. Kim et al. (2005)은 하천수 관개지역에 대해 농업용수 공급량과 용수로 회귀수량과의 상관분석을 수행하였으며, 그 결과 5~6월에 유의수준 1% 이내의 상관관계가 나타나는 것으로 보고하고 있다.



(그림 3-3-39) 월별 농업용수 공급량과 관개회귀수량 구성요소의 관계

라. 본 연구 및 선행 연구 결과 비교를 통한 고찰

<표 3-3-29>은 강우량, 농업용수 공급량, 관개회귀수량, 그리고 회귀율에 대한 본 연구 결과와 선행 연구 결과를 연 단위로 비교하여 보여주고 있다.

본 연구에서 농업용수 공급량은 2011년 2,324 mm, 그리고 2012년 2,008 mm로 나타났다으며, 총 회귀수량은 2011년 1,965 mm, 그리고 2012년 1,588 mm로 나타났다. 선행 연구에서의 관개회귀수량 산정 결과를 살펴보면 317~1,548 mm의 범위로 본 연구결과와 비교하면 낮은 수치인 것으로 나타났다 (임상준, 2000; 정상욱과 손성호, 2001; 최중대와 최예환, 2002; 추태호, 2004a; 추태호, 2004b; 김태철, 2010). 이는 선행 연구 중 최

중대와 최예환 (2002)의 연구를 제외하면 농업용수 공급량이 445~1143 mm로 본 연구 결과와 비교하면 크게 낮아 배수되는 수량 또한 낮아졌기 때문으로 사료된다. 최종대와 최예환 (2002)의 연구는 신속회귀수량만을 고려한 결과로 자연회귀수량이 고려되면 총 회귀수량 결과가 더 커질 것으로 사료된다. 우리나라의 평균 공급량이 약 1,250 mm으로 보고되고 있는 점을 고려하면 (Yoon et al., 2003), 본 연구 대상지 이외에 오승영 등 (2002)의 연구대상지에서 1999년의 경우 3,690 mm, 2000년의 경우 3,160 mm으로, 그리고 이정범 등(2014)에서도 2,056 mm으로 농업용수 공급량이 상당히 높게 관측되고 있어, 이들 지역 또한 관개회귀수량이 높게 나타날 것으로 사료된다.

선행 연구에서의 총 회귀율은 32.2~86.0%의 범위로 김태철 등 (2010)의 결과인 대평양수장 지구의 2003년에 가장 높았으며, 임상준 (2000)의 결과인 기천저수지 지구에서 가장 낮게 나타났다. 본 연구의 이동저수지 지구는 2011년의 경우 84.6%, 2012년의 경우 79.1%로 상당히 높게 나타났으나, 선행 연구 결과의 범위에는 포함되는 것이 확인되었다. 신속회귀수량의 회귀율은 본 연구에서 72.7~79.8%로 나타났으며, 선행연구결과에서의 3.7~52.4%와 비교하면 상당히 큰 수치로 나타났다. 이는 본 연구의 농업용수 공급량은 선행 연구결과의 공급량에 비해 높게 나타났으나, 논에서의 소비수량은 비교적 일정하기 때문에 회귀율이 상대적으로 본 연구에서 크게 나타난 것으로 사료된다.

한편, 송정현 등 (2013a)에 따르면 이동저수지 관개지구의 전체 면적 (1,788.7 ha)에 대한 2001~2009년 연별 공급량은 1,311.8~1,848.6 mm로 관측되고 있으며, 본 연구 결과에서의 10.3 ha 광역 논에 대한 공급량에 비해 더 낮게 관측되고 있다. 실제 관개지구에서는 모든 면적에 대해 용수가 균등하게 관개되지 않을 수 있으며 (박기욱, 1997), 위와 같은 차이는 본 연구의 10.3 ha 광역 논에 대해 관개가 집중되는 물관리가 이루어졌기 때문으로 사료된다. 따라서 이동저수지 관개지구 전체에 대한 농업용수 회귀율은 본 연구 결과에 비해 낮아질 가능성이 있을 것으로 사료된다.

본 연구와 선행 연구결과를 포함한 농업용수 회귀율 분석 결과는 임상준 (2000)와 최종대와 최예환 (2002)의 결과를 제외하고는 모두 우리나라 수자원장기종합계획 (국토해양부, 2011)에서 제시하는 35%를 벗어나고 있다. 최종대와 최예환 (2002)의 결과는 자연회귀수량에 따른 회귀율이 고려되면 35%보다 높아질 것으로 사료된다. 따라서, 향후 합리적이며 경제적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 축적된 조사 결과를 바탕으로 한 회귀율 자료가 물이용 계획에 반영되어야 할 것으로 사료된다 (김태철 등, 2010).

노재경 (2003)에 의하면, 회귀수량을 고려하여 유출량을 모의한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 실측치에 더 유사하게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서와 같이 용수 공급이 용이한 지역은 관개회귀수량을 고려하지 않고 하천 유출량을 모의하는 경우는 오차가 더 커질 것으로 예상되며, 향후 이와 같은 지역에 대한 수문·수질 모델링 수행 시 관개회귀수량은 고려되어야 할 중요한 성분이라 사료된다.

본 연구에서와 같이 관개회귀수량은 수문·수질 모델링 시에 고려되어야 할 주요 요인으로 사료된다. 본 연구 결과는 관개회귀수량에 대한 전반적인 이해를 넓히며, 물이용 계획 수립을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대한다.

<표 3-3-29> 본 연구 및 선행 연구의 관개회귀수량 비교

참고문헌	연도	강우량 (mm)	농업용수 공급량 (mm)	신속회귀수량		지연회귀수량		총 회귀수량	
				수량 (mm)	비율 (%)	수량 (mm)	비율 (%)	수량 (mm)	비율 (%)
본 연구	2011	1,591	2,324	1,854	79.8	111	4.8	1,965	84.6
	2012	1,355	2,008	1,460	72.7	128	6.4	1,588	79.1
김태철 등 (2010) ^a	2003	1,336	445	234	52.4	150	33.6	383	86.0
	2004	1,003	1,053	478	45.4	170	16.1	648	61.5
정상욱과 박기중 (2004) ^a	2003	-	600	182	30.2	141	23.5	323	53.7
추태호 (2004a) ^a	2003	-	655	281	43.0	36	5.5	317	48.5
추태호 (2004b) ^a	2003	-	662	267	40.3	61	9.2	328	49.5
최중대와 최예환 (2002) ^a	2002c	-	839	171	20.4	362	43.2	533	63.5
	2002d	-	710	26	3.7	381	53.7	408	57.4
정상욱과 손성호 (2001) ^b	1999	1,333	3,608	1,170	32.4	-	-	1,170	32.4
	2000	982	3,971	1,548	39.0	-	-	1,548	39.0
임상준 (2000)	1998e	1,237	1,004	105	10.5	230	22.9	335	33.3
	1999e	921	1,143	110	9.6	258	22.6	368	32.2
	1998f	1,237	918	197	21.5	240	26.1	437	47.6
	1999f	921	1,085	165	15.2	253	23.4	419	38.6

- a 는 비강우시 관개회귀수량만 측정하였음
- b 는 신속회귀수량에 대해서만 측정하였음
- c 와 d 는 같은 기간 다른 지역에 대한 결과임
- e 와 f 는 같은 기간 다른 지역에 대한 결과임

6. 하천 네트워크 해석 기반 유량 해석 모형 개발 및 적용

6.1. 하천 네트워크 해석 기반 유량 해석 모형의 개발

농업용 저수지의 하류유역은 농업용수를 공급받는 관개지구와 산림지, 밭 등 관개를 실시하지 않는 비관개지구 (배후유역)가 산재하고 있다. 이러한 저수지 하류 유역의 하천유량은 저수지에서 방류되는 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량과 배후 유역으로부터의 횡 유입량, 관개지구에서의 배수량, 그리고 지하수 유출량 등에 따라 결정된다.

본 연구에서는 저수지 하류 하천유량을 추정하기 위해서 하류유역을 저수지, 관개지구, 그리고 배후 유역으로 구분하고, 저수지 방류량/배후유역 횡 유입량/관개지구 배수량/그리고 지하수 유출량을 모의 후 각 요소들을 홍수 추적 후 합하여 유출구에서의 유량을 모의하는 하천네트워크 기반 유량 해석 모형을 개발하고자 한다. (그림 3-3-40)은 저수지 하류 하천유량 입출력 요소에 대해 보여주고 있다.

가. 비관개지구 유출량

하류 하천 유출량 구성요소 중 비관개지구에서의 유출량은 수정 3단 Tank 모형을 기반으로 모의하며 본 보고서의 [제 3 장 제 1 절]에 상세히 기술되어 있다.

나. 저수지 방류량

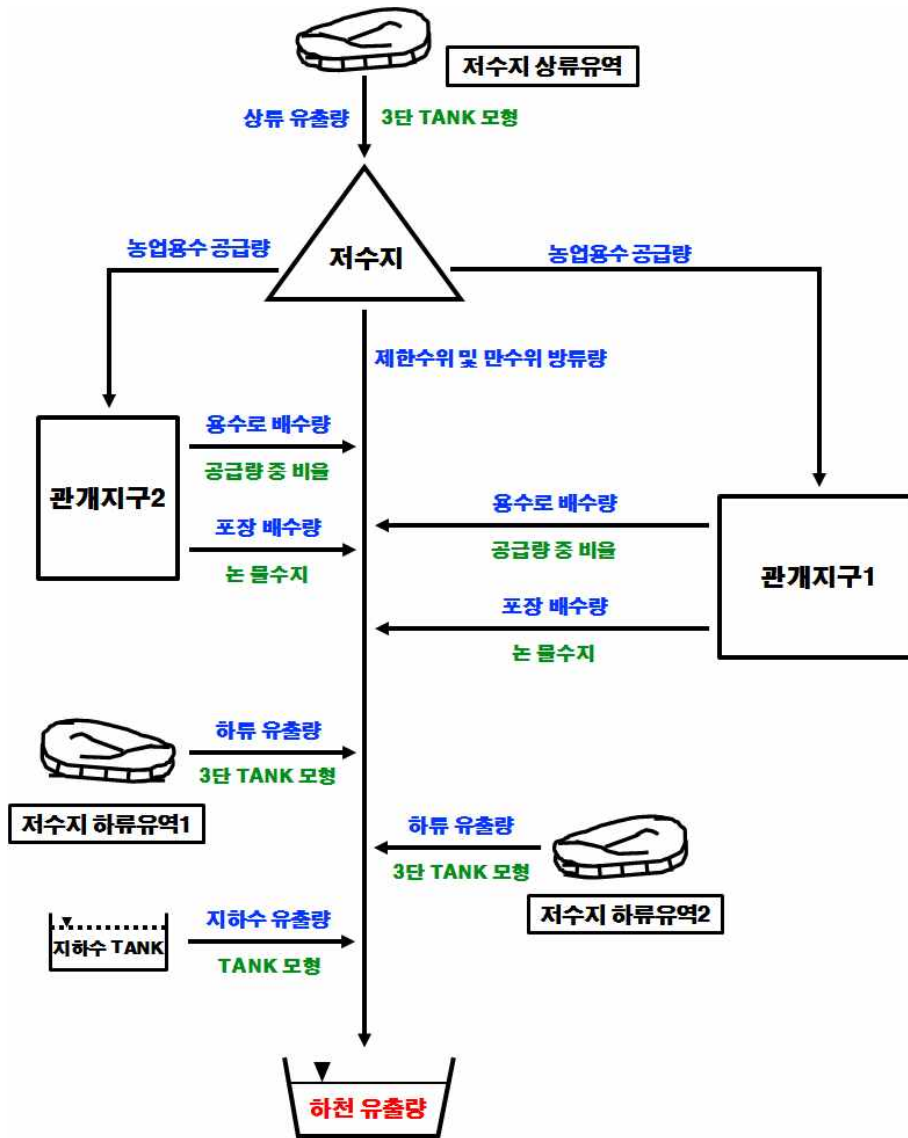
저수지에서 하천으로 직접 방류하는 수량은 제한수위 방류량과 만수위 방류량, 그리고 환경용수 공급량으로 구분된다. 제한수위 방류량은 제한수위 운영기에 제한수위 이상의 저수량을 강제로 방류하는 수량이며, 만수위 방류량은 저수지의 수위가 만수위 이상인 경우 자연 월류식 여수를 통해 방류하는 수량으로 자세한 모의 기작은 본 보고서의 [제 3 장 제 2 절]에 상세히 서술되어 있다.

다. 관개지구 배수량

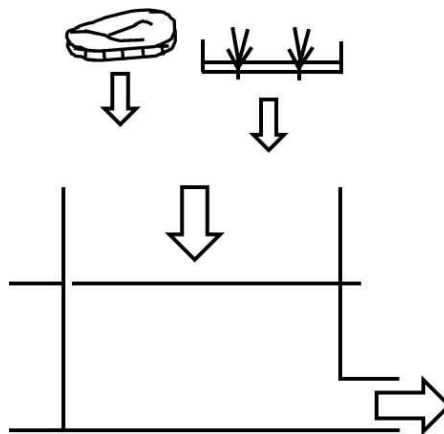
관개지구 배수량은 논 포장 배수량, 용수로 배수량 등으로 구분된다. 논 포장 배수량은 물꼬를 초과하여 하천으로 배수되는 수량으로 강우에 의한 유출량과 농업용수 공급에 의한 관개회귀수량으로 구분된다. 용수로 배수량은 농업용수 공급량 중 논으로 유입되지 않고 하천으로 배수되는 수량으로 관개회귀수량을 일부이다. 관개지구 배수량에 대한 자세한 모의기작은 본 보고서의 [제 3 장 제 3 절 4. 복합영농 관개지구 배수량 추정 모형의 개발 및 적용]에 상세히 기술되어 있다.

라. 지하수 유출량

농업유역의 지하수 유출량은 Tank의 개념을 이용하여 추정할 수 있다. (그림 3-3-41)은 농업유역 지하수 흐름을 개념화하여 표시한 것으로 관개지구 침투량, 송수손실량, 상류유역 침투량, 하류 비관개지구 침투량 등이 Tank로 저장 되어 하천으로 유출된다. 여기서 지하수 유출량은 저류 매개변수의 영향을 받는다.



(그림 3-3-40) 하천 네트워크 해석 기반 유출량 추정기법

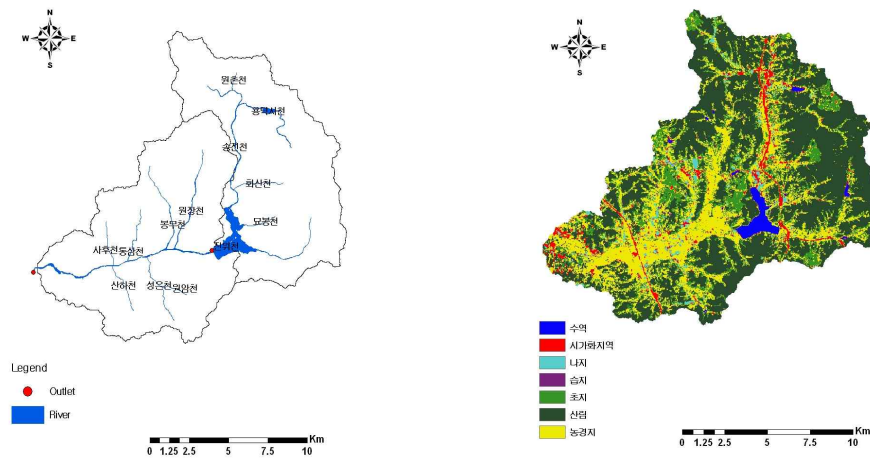


(그림 3-3-41) Tank 기반 지하수 유출량 모형의 개념

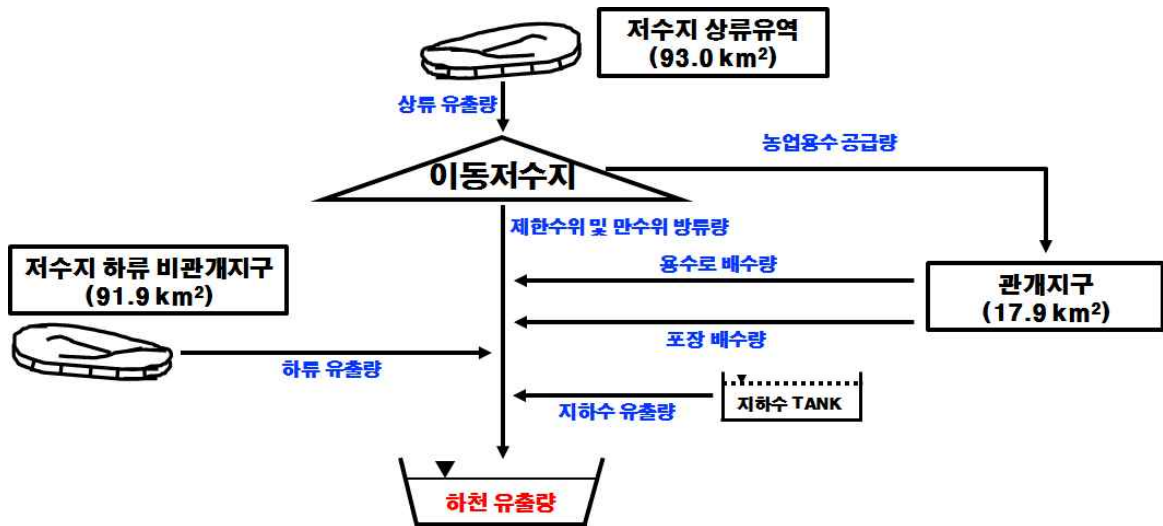
6.2. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 하천 네트워크 해석 기반 수문 모형의 적용성 평가를 위해 이동저수지 유역을 연구대상지로 선정하였다.

이동저수지 유역의 총 면적은 202.8 km²으로 이중 저수지 상류유역의 면적은 93.0 km² (45.9%), 하류 관개지구의 면적은 17.9 km² (8.8%), 하류 비관개지구의 면적은 91.9 km² (45.3%)이다. 본 연구에서는 하천 네트워크 수문 해석을 위해 (그림 3-3-42), (그림 3-3-43)과 같이 이동저수지 유역을 모식화 하였다.



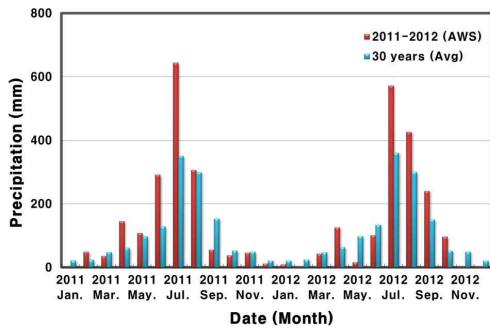
(a) 유역도 (b) 토지이용도
(그림 3-3-42) 이동저수지 유역의 유역도 및 토지이용도



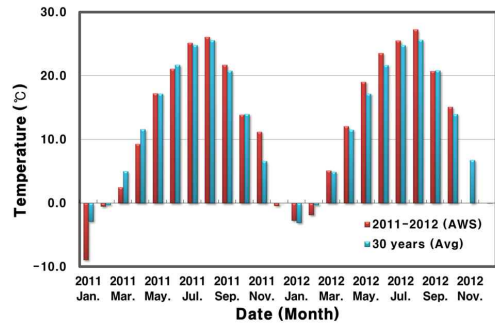
(그림 3-3-43) 이동저수지 유역의 하천 네트워크

(그림 3-3-44)는 대상유역의 2011년, 2012년 동안의 기상자료를 나타내고 있다. 연강수량은 2011년 1391.2 mm, 2012년 1356.8 mm로 측정되었으며, 기온은 기상청 30년 평균 기온과 유사한 경향으로 나타났다. 상대습도는 2011년에는 기상청 30년 평균 습도와

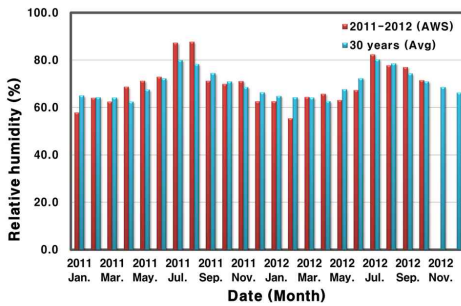
유사한 경향을 보였으며, 7월과 8월에 높은 값을 보였다. 풍속은 6월 이후로 기상청 30년 평균 풍속과 유사한 경향을 보인 반면, 6월 이전에는 2배 이상 큰 것으로 나타났다. 2012년의 경우, 상대습도와 풍속 모두 기상청 30년 평균 습도와 유사한 경향을 보였다. 일사량은 30년 평균 일사량과 유사한 경향을 보였으나 기존 30년 평균값에 비해 크게 나타났다.



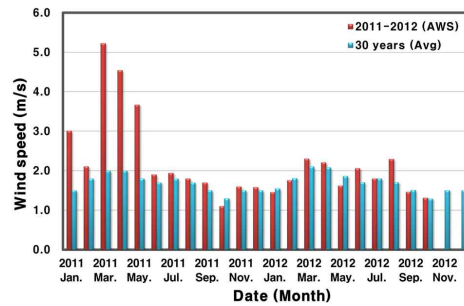
(a) 월평균 강우량



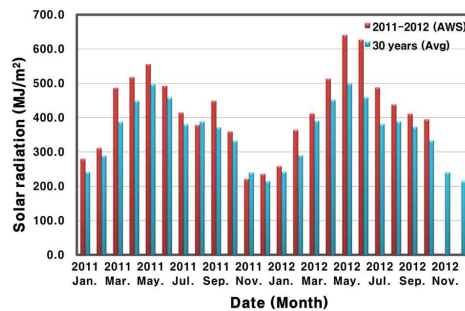
(b) 월평균 기온



(c) 월평균 상대습도



(d) 월평균 풍속



(e) 월평균 일사량

(그림 3-3-44) 2011 ~ 2012년 이동저수지 기상자료

본 연구에서는 모형의 보정 및 검정을 위해 이동저수지 유역의 말단 지점 (진위 지점)에서 관측하는 유출량 자료를 조사하였다. 진위 지점은 2010년 12월부터 수위를 관측하기 시작하였으며 <표 3-3-30>의 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 수위를 유량으로 환산하여 이용하였다.

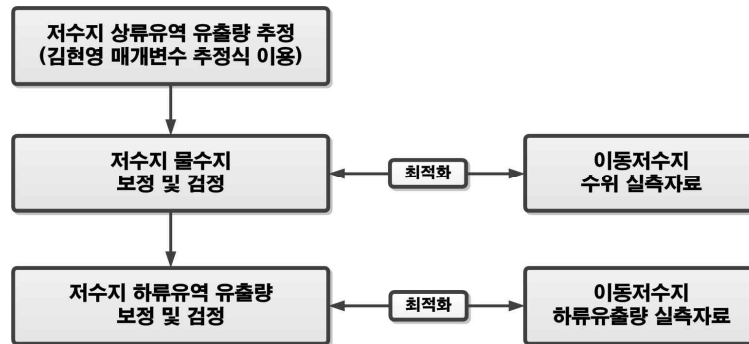
<표 3-3-30> 진위 지점의 수위-유량 관계곡선식

지 점	적용 수위 (m)	수위-유량관계곡선식	이용자료 연도/자료 수	비 고	
진 위	$0.93 \leq h \leq 1.10$	$Q = 1867.167 \times (h - 0.930)^{3.376}$	2011/59	1.00m 이하 외삽	전 기간
	$1.10 < h \leq 1.30$	$Q = 143.289 \times (h - 0.950)^{1.800}$			
	$1.30 < h \leq 8.80$	$Q = 135.403 \times (h - 1.030)^{1.400}$		2.59m 이상 외삽	

6.3. 모형의 적용성 평가

가. 모형의 보정 방법

본 연구에서 개발한 하천 네트워크 해석 기반 수문 모형의 보정은 이동저수지의 저수지 수위 실측자료와 하류 유출량 실측자료를 이용하였다. (그림 3-3-45)는 모형의 보정 방법을 보여주고 있다. 저수지 상류유역 유출량의 추정에는 수정 3단 Tank 모형과 김현영 (1988)에 의한 매개변수 지역화 식을 이용하였다. 상류 유출량을 보정하지 않은 이유는 실측 자료를 보유하고 있지 않기 때문으로 보정 매개변수의 수에 따른 불확실성을 줄이기 위함이다. 저수지 실측 수위 자료를 이용하여 저수지 물수지 요소인 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 그리고 농업용수 공급량을 보정하였다. 저수지 하류 유출량 관련 요소인 비관개지구 유출량 및 지하수 유출량은 이동저수지 실측 유출량 자료를 이용하였다.

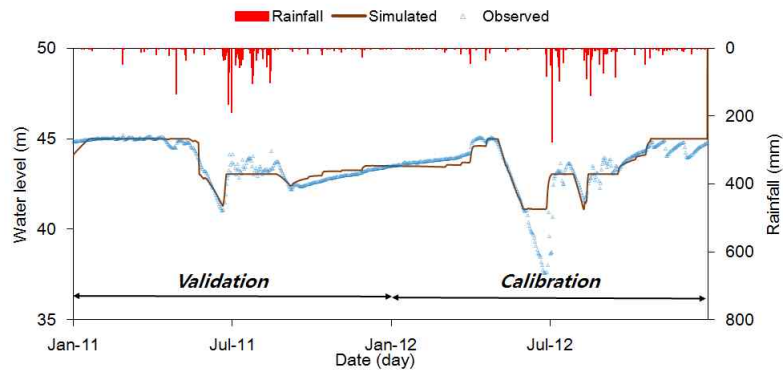


(그림 3-3-45) 농업용 저수지 유역의 모형 보정 방법

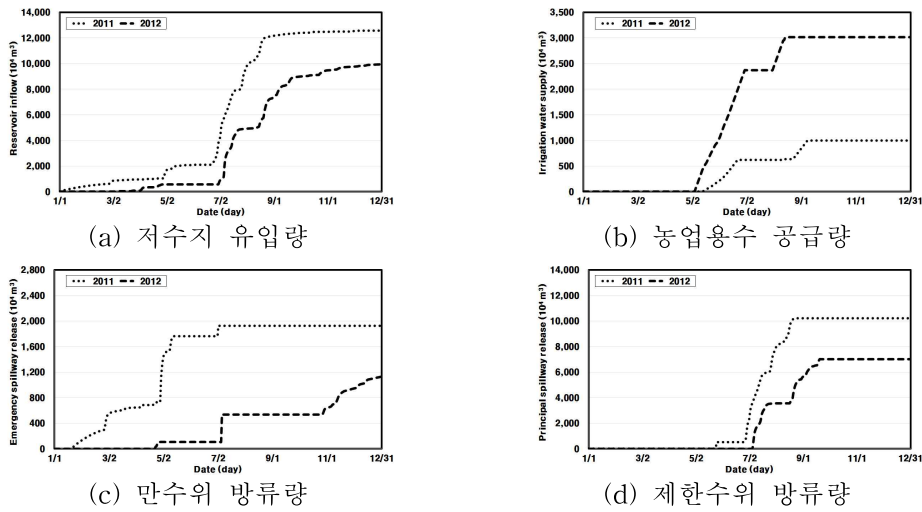
나. 모형의 보정 및 검정

2012년 2월 ~ 12월의 이동저수지의 저수지 수위 실측자료와 하류 유출량 실측자료를 이용하여 개발한 모형의 보정을 실시하였다. (그림 3-3-46)은 보정 및 검정 기간 동안의 이동저수지 실측 수위와 모의 수위를 비교하여 보여주고 있다. (그림 3-3-47)은 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 지역화식 (김현영, 1988) 및 보정된 매개변수를 이용하여 모의한 저수지 유입량, 제한수위 및 만수위 방류량, 농업용수 공급량 결과를 보여주고 있다. (그림 3-3-48)은 보정 및 검정 기간 동안의 하류 유출량의 실측치와 모의치를 나타내고 있다. 보정결과 실측치와 모의치의 통계적 변량은 R^2 는 0.73,

NSE는 0.59, RMSE는 5.49 mm로 나타났으며, 검정결과 실측치와 모의치의 통계적 변량은 R^2 는 0.67, NSE는 0.64, RMSE는 16.31 mm로 나타나 검정기간이 보정기간에 비해 NSE를 제외하고 낮은 통계적 변량을 갖는 것으로 나타났다.



(그림 3-3-46) 저수지 물수지 모형의 보정 및 검정 결과



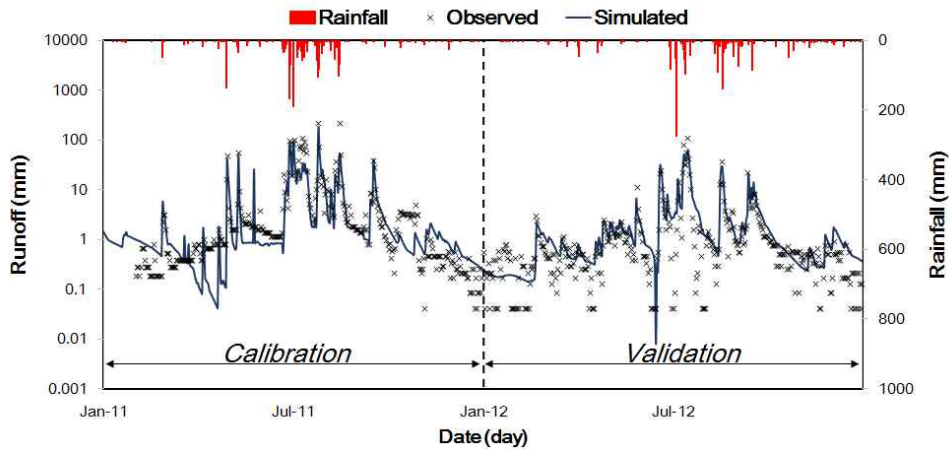
(a) 저수지 유입량

(b) 농업용수 공급량

(c) 만수위 방류량

(d) 제한수위 방류량

(그림 3-3-47) 이동저수지 물수지 분석 결과



(그림 3-3-48) 하천 네트워크 해석 기반 수문 모형의 보정 및 검정결과

7. 요약 및 결론

본 장에서는 저수지 하류유역의 물순환을 해석하는 모형을 COMFARM을 기반으로 설계하였다. 논에서의 수문 및 수질 모의 모형 (수정 CREAMS-PADDY 모형)은 CREAMS-PADDY 모형을 수정/개선하고 전·후처리 컴포넌트를 추가하여 개발하였다. 또한, 복합영농 관개지구 일별 배수량 모형을 개발하여 적용성 평가하였으며, 농업용수 회귀특성을 분석하였다. 하류 유역의 수문 입출력 요소를 고려한 하천유량 모의 모형을 개발하였다. 각 모형의 적용성을 평가하기 위해서 모형별로 연구대상지를 선정하여 자료를 수집하였으며, 모의 결과와 실측 자료를 통계적/도시적으로 비교하여 적용성을 평가하였다. 본 장의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 저수지 하류유역 물순환해석 모형은 컴포넌트 기반 농업유역 물순환 해석 Framework COMFARM에 내재되어 구동되며 자료관리시스템 AWR-DMS와 연동하여 전처리를 수행하며 매개변수 최적화, 그래프 생성, 표 생성, 보고 작성 등의 후처리 과정을 제공한다.
- ② 수정 CREAMS-PADDY 모형의 전처리 컴포넌트 (pre-processing component)는 COMFARM의 자료관리시스템과 연동이 되며, 기상 입력자료를 자동으로 구축할 수 있고, 매개변수 입력 편의성이 개선된 GUI 환경을 제공한다. 후처리 컴포넌트 (post-processing component)에서는 수정 CREAMS-PADDY 모형의 모의 결과인 논 포장 배수량, T-N 배출부하량, T-P 배출부하량 등을 도식적으로 보여주며, 실측치를 입력하면 통계 지표 또한 자동으로 계산한다.
- ③ 수정 CREAMS-PADDY 모형의 매개변수를 보정 및 검정하였으며 보정결과 T-N의 경우 RMSE는 1.12 mg/L, R^2 는 0.95, NSE는 0.94로 나타났고 T-P의 경우 RMSE는 0.11 mg/L, R^2 는 0.72, NSE는 0.58로 나타났다. 검정 결과 T-N의 경우 RMSE는 1.57 mg/L, R^2 는 0.98, NSE는 0.93으로 나타났고 T-P의 경우 RMSE는 0.09 mg/L, R^2 는 0.85, NSE는 0.50으로 나타났다. 보정 및 검정 결과, 모의치는 실측치의 경향을 반영하는 것으로 나타나 수정 CREAMS-PADDY 모형은 논에서의 수문 및 수질을 모의하는데 있어 적용성이 있는 것으로 나타났다.
- ④ 수정 CREAMS-PADDY 모형의 응용성을 평가하기 위해 물관리 (최소담수심 및 물꼬 높이 조절)에 따른 배출부하량 저감효과를 모의하였다. 모의 결과 물꼬 높이 80 mm, 최소담수심 60 mm 대비 물꼬 높이 120 mm 최소담수심 20 mm인 경우 배출부하량을 최대 70-80%까지 저감할 수 있는 것으로 나타났다.
- ⑤ 복합영농 관개지구 수문해석 모형은 논 포장 배수량, 용수로 배수량, 그리고 시설재배지 유출량을 구분하여 일별로 모의한다. 모형의 적용성 평가를 위한 대상지구로 이동저수지 관개지구를 선정하였으며 농업용수 공급량 모의 결과 모의 공급량은 1,142.5 mm, 실측 공급량은 1,218.5 mm으로 나타났으며 결정계수가 0.745의 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.
- ⑥ 복합영농 관개지구의 배수량 추정 적용성을 평가하기 위하여 시험지구에 대하여 모형의 매개변수를 보정 및 검정하였다. 보정 결과, 실측 배수량은 2505.0 mm, 모

의 배수량은 2,285.4 mm로 R^2 는 0.75, NSE는 0.74 RMSE는 11.11 mm/day, RMAE는 0.49 mm/day 이었다. 검정 결과, 실측 배수량은 3,015.6 mm, 모의 배수량은 2,922.1 mm로 R^2 는 0.65, NSE는 0.68 RMSE는 11.62 mm/day, RMAE는 0.32 mm/day 이었다.

- ⑦ 대상 관개지구의 총 회귀수량은 2011년 1,965 mm, 2012년 1,588 mm으로 나타났고, 농업용수 회귀율은 2011년 84.6%, 2012년 79.1%로 선행연구결과와 비교하여 비교적 높게 나타났다.
- ⑧ 저수지 하류유역의 유출량을 추정하기 위하여 하천 네트워크 해석 기반의 하천유량 모의 모형을 개발하였으며, 저수지에서 방류되는 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량과 하류 비관개지구에서 유입되는 횡유입량, 관개지구의 배수량, 그리고 지하수 유출량 등의 입출력 요소를 통해 하천유량을 추정한다. 다만, 지하수 유출은 지하수 수층을 하나의 Tank로 간주하여 모의하고 있으며, 지하수 모의의 복잡성을 고려하면 추후 보완이 필요할 것이다.
- ⑨ 하천유량 모의 모형의 적용성 평가를 위하여 이동저수지 유역 (이동저수지 상류유역, 이동저수지, 이동저수지 하류유역)의 하류 유출량 자료 (진위지점) 및 모형의 입력자료를 구축하였다. 이동저수지 실측 수위를 이용하여 저수지 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량에 대하여 보정 및 검정하였으며, 하류 실측 자료를 이용하여 비관개지구 유출량 및 지하수 유출량에 대하여 보정 및 검정하였다.
- ⑩ 보정 및 검정 결과, 하류 유출량의 모의치와 실측치 사이의 통계적 변량은 보정 기간에 대해 R^2 는 0.73, NSE는 0.59, RMSE는 5.49 mm로 나타났고 검정기간에 대해 R^2 는 0.67, NSE는 0.64, RMSE는 16.31 mm로 나타나 모의치는 실측치의 경향을 반영하는 것으로 나타났다.

이와 같이, 저수지 하류유역 물순환 해석 모형을 개발하기 위하여 COMFARM을 기반으로 수정 CREAMS-PADDY 모형, 복합영농 관개지구 배수량 모형, 하천네트워크 기반 수문해석 모형을 개발하였으며 모의 결과와 실측자료를 통계적/도시적으로 비교하여 적용성을 평가하였다. 본 장의 연구결과는 농업유역의 수문순환 대한 전반적인 이해를 넓히며, 농촌용수 물순환 종합해석 모형의 요소기술로 이용할 수 있을 것이다.

제 4 절 통합모델링 최적화 기술의 개발

1. 서 론

수문 및 수질 모형은 다양한 공간적 규모에 대한 수문순환 등을 모의하기 위해 개발되어 왔으며, 구동을 위해서는 매개변수에 대한 이해 및 적적할 입력 자료의 구축이 중요한 요소 중 하나이다. 즉, 수문 및 수질 모형을 통해 물순환을 정확하게 모의하기 위해서는 주요 매개변수를 물리적 범위에 근거하여 해당 유역특성에 맞는 값을 선정할 필요가 있다. 이를 위해 매개변수에 대한 모형의 보정이 필요하며, 매개변수 선정 자동화를 위한 무수히 많은 최적화 기법들이 개발되어 사용되어지고 있다 (송정현 등, 2014a).

최적화 이론은 모든 가능한 대안에 대해 일일이 계산하고 평가해 보지 않고도 최선의 대안을 찾아내기 위한 수치계산방법이라 할 수 있다. 최적화이론은 본래 Operations Research (OR)에서 유래되었으며, OR은 과학적인 방법·수법·기법 등을 시스템 운용에 관한 문제에 적용하여 의사결정에 대한 계량적 기초 즉, 최적해를 제공하는 과학적 방법이라 정의될 수 있다 (송정현 등, 2014a). 최적화 문제의 일반적인 형태는 결정변수로 표현되는 목적함수를 최대화하거나 최소화하는 형태이다. 물순환 모형의 경우 매개변수 최적화라고 하며, 결정변수는 최적화하고자 하는 매개변수가 되며, 목적함수는 관측치와 측정값 사이의 오차를 최소화하는 것이 될 수 있다 (Rao, 2009; Yakimenko, 2011; 송정현 등, 2014a).

최적화 문제는 목적함수와 제약조건 식들의 두 중요한 부분으로 구성되어 있다. 목적함수는 시스템의 최적화 정도를 나타내는 척도라고 볼 수 있고, 그 척도가 비용일 경우는 최소화 (minimizing)문제이며, 이익일 경우는 최대화 (maximizing)문제가 된다. 제약조건식은 시스템이 설계 또는 해석되어야 하는 조건들을 수식으로 나타낸 것이며 등식 또는 부등식의 형태로 주어진다. 제약조건식으로는 기술적조건, 경제적 또는 예산에 관련된 조건, 설계조건, 운영조건, 수요조건 등이 있을 수 있다 (Rao, 2009; Venkataraman, 2009; Yakimenko, 2011; 송정현 등, 2014).

최적의 목적함수 값은 아니지만, 제약조건을 만족시키는 범위의 매개변수들의 집합을 가능해영역 (feasible region)이라고 정의하고, 최적해 (optimal solution)는 가능해들 중 최적의 목적함수를 만드는 해를 일컫는다 (Rao, 2009).

최적해를 찾기 위해 가장 전통적인 설계 및 해석방법은 주로 반복적인 시행착오법에 의한 것인데, 이 방법은 공학자의 경험/기술/직감/수문모형에 대한 지식정도 등에 효율성이 좌우된다. 따라서 전통적인 방법은 인간적인 요소와 밀접한 관계에 있으며, 그 결과 복잡한 시스템의 설계 및 해석에는 비효율적인 경우가 많다.

이에 반하여 최적화 기법은 의사결정을 위해 수학적 접근방법을 사용함으로써 논리 전개가 정연하다. 그러나 많은 공학자들이 최적화 기법을 실무에 적용할 경우, 그 기법에 대해 이해를 하고 있으나 최적화 기법을 새로 코딩해야하는 문제 등 연계/적용하는데 있어 어려움을 겪을 수 있다. 최근에는 최적화기법 알고리즘이 내재되어 있는 소프트웨어들이 개발되고 있으며, 이를 수문모형에 연계하면 쉽게 적용이 가능하다 (송정현 등, 2014a).

본 절에서는 앞 절에서 개발한 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 해석 Framework COMFARM의 요소 기술 모형을 보정 및 검증하는 매개변수 최적화 모듈을 개발한다. 최적화 모듈에서는 저수지 유입량 모형, 저수지 물수지 해석 모형, 그리고 하류 하천유량 모형 등이 상호 연계되어 통합된 모델링 환경 속에서 매개변수를 최적화 할 수 있다.

2. 매개변수 최적화 모듈의 개발

2.1. 최적화 기법

가. 최적화 기법의 선정

(1) 선형계획법

목적함수와 제약조건이 모두 선형인 경우에는 대상 시스템이 선형이라고 말하고, 선형계획법 (linear programming)에 의해 최적해를 찾는다. 선형계획법문제의 일반적인 형태는 다음과 같이 나타내어질 수 있다 (Venkataraman, 2009).

$$Max \text{ (or Min)} x_0 = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3-4-1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{for } i=1, 2, \dots, m \quad (3-4-2)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, n \quad (3-4-3)$$

여기서 식 (3-4-1)은 목적함수식, c_j 는 목적함수식의 계수이며, 식 (3-4-2)는 제약조건식, a_{ij} 는 제약조건식의 계수, b_i 는 제약조건식의 우변에 위치한 계수, 식 (3-4-3)은 비음조건 (nonnegativity constraint)으로, 매개변수가 0 이상이어야 함을 뜻한다.

제약조건식들이 전부 선형함수이므로 최적해가 포함되어 있는 가능해영역 (feasible region)은 다각형의 내부와 경계선으로 주어지게 되는데, 이 다각형의 꼭짓점을 가능꼭짓점 (feasible extreme point)이라 한다.

(2) 비선형계획법

비선형계획법 (nonlinear programming)은 목적함수식이나 제약조건식에 비선형함수로 표현되어 있는 경우를 말하며, 선형계획법과 달리 널리 통용되는 방법이 존재하지 않는다. 비선형시스템의 특징은 비선형함수가 얼마나 포함되어있는지, 매개변수의 수가 몇 개 인지 등에 따라 다양하므로, 특정 알고리즘이 어떤 비선형시스템의 최적해를 효율적으로 탐색하였다고 하여도, 다른 비선형시스템에서는 해를 못 찾는 경우가 발생한다 (Venkataraman, 2009). 수문모형은 강우가 유출로 전이되는 동안 차단, 침투, 증발산, 지체, 추적 등의 다양한 수문학적인 비선형 과정을 거치게 되며, 이를 최적화의 일반식으로 표현하기가 쉽지 않다.

목적함수가 최대화이나 최소화이나에 따라 단 1개의 최댓값과 최솟값만이 전역최적해이다. 나머지의 극값들은 지역최적해라고 부른다. 비선형계획법을 풀기 위한 방법은 다음과 같이 크게 3가지 정도로 구분된다 (Chapra and Canale, 2006).

- ① 선형계획법으로 근사한 후, 민감도 분석 등을 통해 해를 찾는 방법
- ② 비선형계획법에 존재하는 제약조건식의 미분을 통해 최댓값 혹은 최솟값을 찾는 방법
- ③ 전체 가능해 영역을 탐색하는 방법

첫 번째 방법인 선형식으로 변환하여 푸는 경우는 근사해를 제공하나, 수문 모형의 경우 제약조건이 많아 다루기는 적절하지 않다. 두 번째 방법은 제약조건식이 존재하지 않는 경우, 비선형계획법의 목적함수를 미분하여 극값들을 찾는 방법으로 제약조건이 존재할 경우에는 라그랑지 승수법 (Lagrange multiplier method)이나 쿤-터커 정리 (Kuhn-Tucker Theorem)에 의해 제약이 없는 비선형계획법으로 변환한 후 같은 방법을 적용할 수 있다. 이러한 방법은 빠르게 해를 찾을 수 있으나, 지역최적해를 찾을 가능성이 크고, 목적함수가 미분 가능해야 한다는 제약이 따른다. 마지막 방법은 전체 가능해 영역을 탐색하는 전역탐색법으로 가장 확실히 최적해를 찾을 수 있는 방법이나 매개변수가 많아질수록 많은 계산시간을 요하는 단점이 있으나, 최근 컴퓨터 기술의 발달과 함께 비선형성이 매우 큰 시스템의 해를 찾는데 널리 적용되고 있다 (Chapra and Canale, 2006).

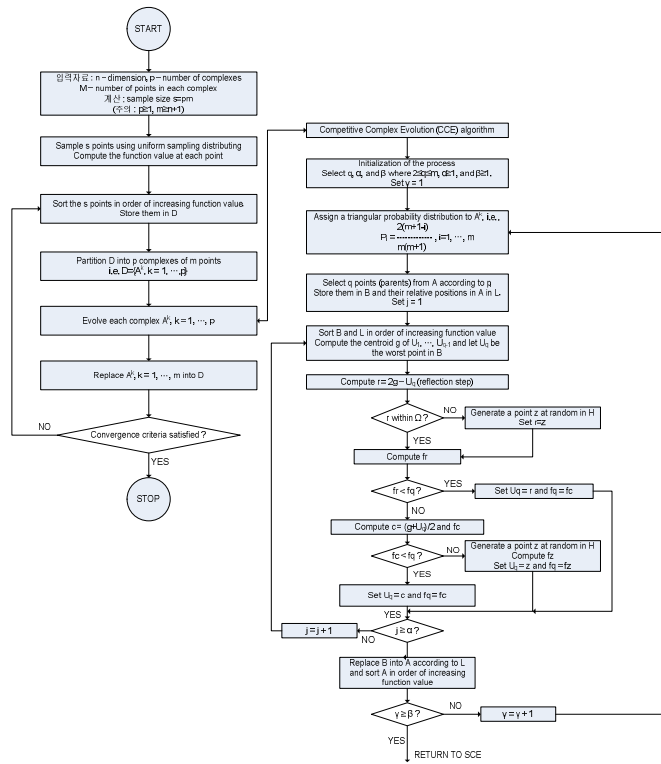
(3) 전역최적화 기법

전역최적화 기법은 최적해를 탐색하기 위해 전체 가능해 영역에 초기 탐색해를 정의한다. 그리고 초기해 집합 중에서 가장 좋은 해가 최적해에 가깝다는 가정을 세우고, 최적해 방향으로 나머지 해들이 탐색을 시작하도록 고안된 방법이다. 최적해를 탐색해 나갈 때, 초기해 집합 중에 최적해에 가까운 값들이 포함되어 있지 않을 가능성도 존재하므로, 이를 해결하기 위해 무작위성을 도입하여, 기존에 탐색해 중에서 특정해들을 기각하고 새로운 해들로 바꾸기도 한다. 이때 적용되는 탐색 알고리즘에 따라 전역최적화 기법들은 다른 이름으로 불린다. 본 절에서는 SCE-UA, 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm), ACO (Ant Colony Optimization), PSO (Particle, swarm optimization)를 중심으로 간략히 소개하였으며 다음과 같다.

① SCE-UA

SCE-UA 방법은 미국의 애리조나 대학교의 Duan et al. (1992, 1993)에 의해 제안된 방법으로 simplex procedure, controlled random search, competitive evolution, new complex shuffling concept가 조합된 방법이다. 전역 최적화 기법은 전체 해공간을 탐색하여 해를 찾아가는 방법으로 최적해에 해의 모집단이 궁극적으로는 모이도록 특정한 기법을 적용하여 해를 진화시킨다.

전체 모집단이 p 개의 complex로 분리되며, 각각의 complex는 m 개의 포인트가 속해 있다. 매개변수의 범위 내에서 추출된 매개변수의 세트를 이용해 모의한 목적함수의 결과를 이용하여 매개변수를 점차 최적해 가까이로 이동시킨다. 이때 모집단이 모두 동시에 진화하지 않고, p 개의 complex로 나뉘어 진화하게 되는데, 이 때 경쟁 진화 알고리즘 (CEE algorithm)이 사용된다. 각자 진화된 complex 들은 다시 모집단에서 섞이고, p 개의 complex로 나뉘어 진화하는 단계를 거치게 된다. 이러한 과정을 거쳐 점차 진화된 모집단의 구성요소들은 모두 최적해에 접근한다 (그림 3-4-1).

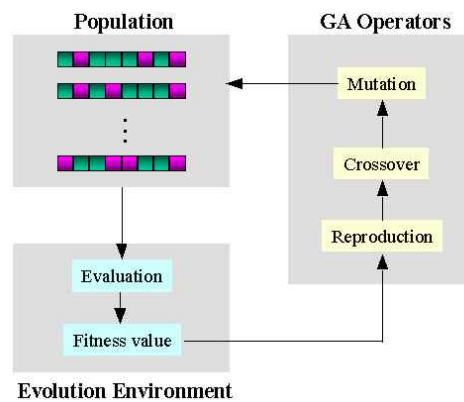


(그림 3-4-1) Flowchart of SCE-UA Algorithm (Duan et al., 1992)

② 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 John Holland에 의해서 1975년에 개발된 전역 최적화 기법이다. 생물의 진화를 모방한 진화 연산의 대표적인 기법으로, 실제 진화의 과정에서 많은 부분을 차용하였으며, 변이(돌연변이), 교배 연산 등이 존재한다.

유전자 알고리즘은 가장 널리 사용되는 전역해 탐색기법으로, 이진수가 아닌 실수로 코딩하는 유전자 알고리즘, 돌연변이와 교배연산에 속도향상 기법을 적용하는 등 전역해 탐색기법의 단점인 느린 탐색속도를 향상시키기 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 유전자 알고리즘은 (그림 3-4-2)와 같은 순서로 작용한다.

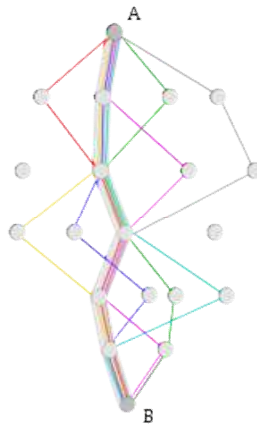


(그림 3-4-2) 유전자 알고리즘 순서도 (<http://www.ewh.ieee.org>)

③ ACO

Marco Dorigo et al. (1996)에 의해 제안된 이 방법은, 먹이를 찾는 개미의 행동을 보고 만들어졌다. 먹이(B)와 개미의 집(A) 사이에 다양한 길이 존재할 때, 첫 번째 개미가 (B)방향으로 어느 길이든 경유해 먹이를 찾아낸다. 그러면 개미는 (A)방향으로 페로몬을 남기며 집으로 돌아온다. 개미는 집에서 먹이까지 다양한 이동경로를 가질 수 있다. 하지만 시간이 지나면 개미들은 가장 짧은 길을 선택한다. 결국 페로몬이 증발하면서 긴 길은 사라지게 된다. 그러므로 결국에는 최적의 길을 선택한다는 알고리즘이다. 개미들은 다음과 같은 과정을 따른다 (그림 3-4-3).

- ㉠ 개미들은 무작정 개미집 주변을 돌아다닌다.
- ㉡ 만약 음식을 찾아내면 개미는 페로몬을 뿌리며 집으로 돌아온다.
- ㉢ 페로몬은 매우 매력적이어서 개미가 따라가고 싶어 만든다.
- ㉣ 개미가 집으로 돌아오는 횟수가 많을수록 그 경로는 더 견고해진다.
- ㉤ 긴 경로와 짧은 경로가 있으면 같은 시간에 짧은 경로로 이동할 수 있는 횟수가 많다.
- ㉥ 짧은 경로는 갈수록 더 많은 페로몬이 뿌려지면서 더욱 견고해진다.
- ㉦ 페로몬은 휘발성이기 때문에 시간이 지나면서 긴 경로는 사라진다.
- ㉧ 결국 모든 개미가 짧은 경로를 선택한다.



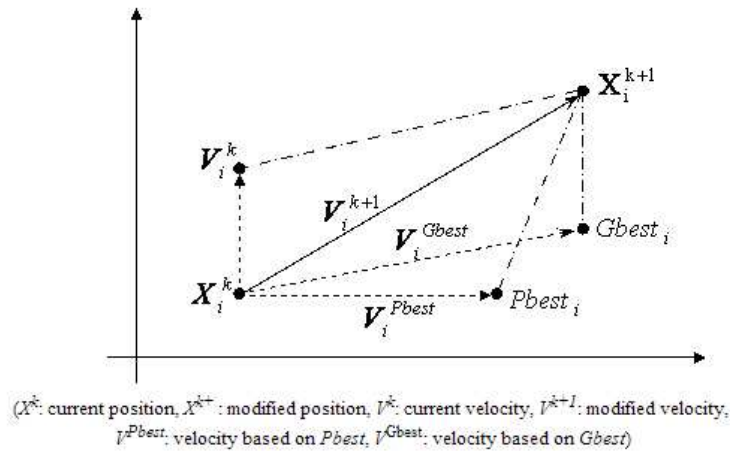
(그림 3-4-3) Ant Colony Optimization 최적화 과정

④ PSO

PSO method는 전역최적화 문제를 해결하기 위한 Swarm Intelligence method (Kennedy and Eberhart, 2001)의 한 범주이다. J. Kennedy에 의해 최초로 제안되었으며, 최적화 기법으로는 Kennedy and Eberhart (1995)에 처음으로 제안되었다. PSO 알고리즘은 다른 탐색 알고리즘과는 달리 진화연산처럼 방대하고 복잡한 함수에 대하여 전역 최적화할 수 있는 장점을 가지고 있고 진화연산보다 수행 속도가 빠르기 때문에 최근 주목받고 있으며, 기존의 알고리즘으로 해결하기 어려운 분야에 적용되고 있다.

PSO 알고리즘에서는 각각의 Particle이 자신의 비행이력과 다른 Particle들의 비행이력을 이용하여 자신의 다음 비행을 조절하게 된다. 즉 임의의 Particle의 이전 속도와 이전 경험한 위치 중 가장 좋은 위치와의 거리, 그리고 Swarm의 가장 좋은 경험에 의거하여 새로운 속도를 계산한다. 이 새로운 속도를 가지고 단위 시간에 움직이면 새

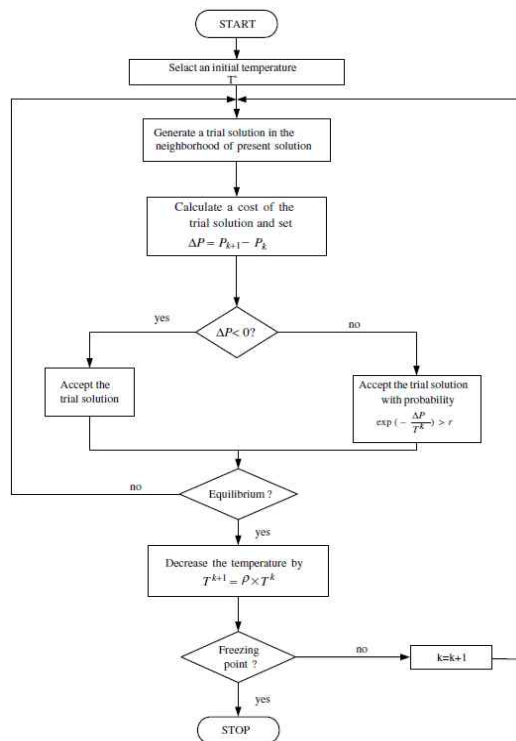
로운 위치에 입자가 위치하게 된다 (그림 3-4-4).



(그림 3-4-4) PSO의 최적화 과정

⑤ Simulated Annealing법

조합적 최적화 문제의 한 해법으로서 Kirkpatrick et al. (1983)에 의해 제안된 Simulated Annealing법은 기존의 반복적인 개선 (iterative improvement)에 근거한 발견적 기법 (heuristic methods)들이 국부 최소점에 빠져버리는 단점을 개선한 범용의 최적화기법으로 현재까지 많은 분야에서 응용되고 있다. SA는 적용상에서 계산시간이 길다는 단점을 가지고 있으므로, 해의 질을 떨어뜨리지 않고 계산시간을 줄일 수 있는 SA의 변형을 고려할 필요가 있다 (윤복식과 송낙운, 1995). (그림 3-4-5)는 Simulated Annealing 모식도를 나타낸다.



(그림 3-4-5) Simulated Annealing 모식도 (Chang et al., 2006)

나. 목적함수

수문모형의 매개변수 최적화는 일반적으로 관측치와 모의치의 차이를 최소화 하는 것이다. 그러나 모형이 강우사상모형인 경우와 장기유출모형인 경우에 따라, 혹은 모형의 목적에 따라 목적함수의 형태는 다양하게 구성할 수 있다. 아래는 홍수사상모형에 대해 주로 이용되는 4가지 형태의 목적함수이다.

(1) SAE (Sum of Absolute Errors)

SAE (Sum of Absolute Errors)는 식 (3-4-4)와 같으며 관측치과 모의치의 종거별로 동일한 가중치를 가진다고 가정하고, 각 차이의 절대값을 더한 형태를 나타내며, 관측치와 모의치의 침투값, 총체적, 침투시간이 모두 정확하게 맞아야 한다는 가정을 가지고 있다.

$$Z = \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (3-4-4)$$

여기서, n 은 관측치의 개수, Z 는 목적함수, O 는 관측치, P 는 모의치이다.

(2) SSR (Sum of Squared Residuals)

SSR (Sum of Squared Residuals)은 매개변수 최적화에 가장 많이 사용되는 형태의 목적함수로, 많은 차이가 나는 종거에 더 큰 가중치를 부여한다. 즉, $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 종거 차이가 나는 경우에는 목적함수에 100이 더해지지만, $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 종거 차이는 목적함수에 1이 더해지는 결과를 초래한다. 역시 관측치와 모의치의 침투값, 총체적, 침투시간이 모두 일치해야 한다고 가정하는 방법이다.

$$Z = \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2 \quad (3-4-5)$$

(3) PE (Percent Error in peak)

강우사상모형의 경우에는 간혹 침투값의 모의가 매우 중요한 경우가 있다. 이런 경우, 관측치와 모의치의 침투값의 차이만을 퍼센트 오차의 형태로 고려하는 함수이다. 이러한 형태의 목적함수는 수공구조물의 설계를 위해 침투값만 필요할 때 사용될 수 있다.

$$Z = 100 \left| \frac{P(\text{peak}) - O(\text{peak})}{O(\text{peak})} \right| \quad (3-4-6)$$

여기서, $O(\text{peak})$ 는 관측된 유량의 침투값, $P(\text{peak})$ 는 계산된 유량의 침투값이다.

(4) P-RMSE (Peak-weighted Root Mean Square Error)

P-RMSE (Peak-weighted Root Mean Square Error)는 미공병단에서 HEC-1에 삽입하기 위해 개발한 목적함수이며, 모든 종거차의 제곱에 관측된 종거값의 평균과의 차이로 가중치를 산정하여 곱하는 방법이다. 예를 들어, 관측된 유량의 평균값보다 작은 관측치를 가지는 종거는 1보다 작은 가중치를 가지며, 관측된 유량의 평균값보다 큰 관측치를 가지는 종거는 1보다 큰 가중치를 가진다. 첨두값이 가장 큰 가중치를 가지는 형태로, 관측치가 클수록 큰 가중치를 고려하여 첨두값을 보다 잘 모의하기 위해 개발된 형태의 목적함수로, 강우사상모형에 적합하다.

$$Z = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \left(\frac{O_i - \bar{O}}{2\bar{O}} \right) \right\} \right]^{1/2} \quad (3-4-7)$$

여기서, \bar{O} 는 관측된 유량의 평균이다.

위와 같이 다양한 형태의 목적함수가 존재하므로, 사용자의 목적에 따라 적합한 형태의 목적함수를 선택하여 사용하여야 한다. 예를 들어, 강우사상모형과 장기유출모형의 경우에는 사용되는 목적함수가 같을 수 없다. 즉, HEC-HMS와 같은 강우사상모형의 경우에는 첨두유출량에 관심이 있으므로, 첨두유출량에 가중치를 부여하는 형태의 목적함수가 사용되어야 하지만, SWAT (Soil Water Assessment Tool)이나 Tank 모형과 같이 장기유출모형의 경우에는 고유출량 및 저유출량 모두 관심을 가져야 하므로 총 유출량과 같이 다른 쪽에 가중치를 두거나, 가중치를 두지 않는 형태의 목적함수를 사용하여야 한다.

(5) 결정계수

결정계수 (R^2)는 다음 식 (3-4-8)과 같이 정의된다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (3-4-8)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치이다.

결정계수는 실측치와 모의치가 유사한지를 나타내는 지표이며, 0에서 1의 범위에서 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영할수록 1에 가까운 수치를 나타낸다. 그러나 결정계수는 모의치가 실측치에 비해 과대 또는 과소 추정되더라도 실측치의 경향을 반영하면 높은 값을 나타내는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, Krause et al. (2005)은 모의치와 실측치의 상관관계의 기울기 (b)를 이용하여 다음 식 (3-4-9)를 제안한 바 있다.

$$wR^2 = \begin{cases} |b| \cdot R^2 & \text{if } b \leq 1 \\ |b|^{-1} \cdot R^2 & \text{if } b > 1 \end{cases} \quad (3-4-9)$$

여기서, wr^2 는 가중 결정계수, b 는 모의치와 실측치의 상관관계의 기울기이며, r^2 는 결정계수이다. 이를 이용하여 과대 또는 과소 추정된 경우를 반영하여 모의 결과를 평가할 수 있다.

(6) RMSE

평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)는 정량적 평가방법으로 많이 쓰이고 있으며 다음 식 (3-4-10)과 같다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \quad (3-4-10)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치이다.

평균제곱근오차는 모의치와 실측치의 차를 제곱근을 이용하여 계산하며, 오차의 크기가 클수록 값이 커진다. 이 방법은 오차의 값을 정량적으로 알수는 있지만 오차의 정도를 파악하기에는 한계가 있다.

(7) RSR

앞서 본 모형의 평가방법 중 하나인 RMSE는 실측치와 모의치간의 차이만을 나타내기 때문에, 이를 표준화해서 나타내는 것이 필요하다. Singh et al. (2004)은 RMSE 값이 낮은 것이 모형의 모의능력이 좋다고 평가할 수 있으나, 어느 정도의 RMSE 값이 낮은 것인지는 불분명하므로, 실측치의 표준편차를 고려하여 RMSE 값에 나눠주면 무차원 단위로 표준화할 수 있을 것이라고 하였다. 따라서, Moriasi et al. (2007)은 이를 고려하여 RMSE-observations standard deviation ratio (RSR)을 개발되었다 (Moriasi et al., 2007). RSR은 식 (3-4-11)과 같이 계산된다.

$$\text{RSR} = \text{RMSE}/\text{STDEV}_{\text{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]} \quad (3-4-11)$$

여기서, O_i 는 실측치, P_i 는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균이다.

모형이 완벽한 모의를 수행하였을 경우, 최적값은 0이며, RSR의 값이 낮을수록 RMSE 값도 낮게 나타난다.

(8) nRMSE

오차의 정도를 나타내기 위해 정규화된 평균제곱근오차 (normalized Root Mean Square Error, nRMSE)는 식 (3-4-12)와 같다.

$$\text{nRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3-4-12)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균, n 은 자료 수를 의미한다. nRMSE는 모의치와 실측치의 차를 %로 표현하여 오차의 정도를 표현할 수 있으며, 그 값이 10 % 미만일 경우 모형의 적용성이 탁월한 것으로, 10 % 이상 20 % 미만일 경우 좋은 것으로, 20 % 이상 30 % 미만일 경우 평범한 것으로, 30 % 이상일 경우 좋지 않은 모형으로 평가할 수 있다 (Jamieson et al., 1991; 정한석 등, 2011).

(9) RMAE

RMAE (relative mean absolute error)는 식 (3-4-13)과 같다.

$$\text{RMAE} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]}{\bar{O}} \quad (3-4-13)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균, n 은 자료 수를 의미한다. RMAE는 RMSE에 비하여 오차의 크기를 더 효율적으로 나타내는 지표로 이용된다 (강문성, 2002).

(10) Nash-Sutcliffe Efficiency

모형의 효율지수 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)는 1970년 Nash and Sutcliffe (1970)에 의해 제안된 식으로 다음과 식 (3-4-14)와 같이 정의한다.

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3-4-14)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치, \bar{O} 는 실측치의 평균치이다.

NSE는 $-\infty \sim 1.0$ 의 범위로 나타나고 1.0의 값에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미하며, 만약 음수 값이 나타나면 모의 결과를 이용하는 것보다 실측치의 평균을 이용하는 것이 더 좋을 것을 의미한다 (Legates and McCabe, 1999; Kang et al., 2006; 송정현 등, 2015b). 하지만, NSE는 오차의 제곱으로 계산되기 때문에, 높은 값의 차는 과대평가될 수 있고, 낮은 값의 차이는 과소평가될 수 있는 단점이 있다 (Krause et al., 2005). 이러한 단점을 보완하기 위하여 Krause et al. (2005)은 실측치와 모의치의 로그값을 이용하여 NSE를 계산하는 방법을 소개하였다. 이 방법

은 작은 값의 차이를 민감하게 반영하여 모의 결과를 평가할 수 있는 장점이 있다.

(11) 일치도

모형의 일치도 (index of agreement, d)는 NSE 와 R^2 의 단점을 극복하기 위해 Willmot (1981)에 의해 제안되었다. 일치도는 다음 식 (3-4-15)와 같이 정의된다.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3-4-15)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치이다.

d값의 범위는 0과 1사이며, 1에 가까울수록 모의치가 실측치와 유사함을 의미한다. 그러나 일치도는 상대적으로 높은 값 (0.65 이상)이지만 모의치가 실측과 잘 맞지 않을 수 있으며, 연구자의 개발 의도와 달리 모의치와 실측치의 차가 크거나 작은 경우를 평가하기에 적절하지 않은 경우가 있다 (Krause et al., 2005).

이상의 대표적인 목적함수는 <표 3-4-1>에 식을 정리하였다.

(12) 상대오차

모형의 추정 오차를 평가하기 위한 상대오차 (relative bias, RB)는 다음 식 (3-4-16)과 같이 계산된다.

$$RB = \frac{\bar{P} - \bar{O}}{\bar{O}} \quad (3-4-16)$$

여기서, \bar{O} 는 실측치의 평균치, \bar{P} 는 모의치의 평균치이다.

(13) PBIAS

백분율 편차 (Percent Bias, PBIAS)는 모의치의 평균경향을 실측치와 비교한 것이다 (Gupta et al., 1999; Moriasi et al., 2007). PBIAS는 식 (3-4-17)과 같이 계산된다.

$$PBIAS = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i) \right]} \quad (3-4-17)$$

여기서, O 는 실측치, P 는 모의치이다.

$PBIAS$ 는 0.0이 최적 값이고, 양수 값 및 음수 값은 각각 과소 및 과대 모의되었음을 의미한다 (Gupta et al., 1999; 송정현 등, 2015b).

<표 3-4-1> 대표 목적함수의 종류 및 구성식

목적함수	식	비고
SAE	$Z = \sum_{i=1}^n O_i - P_i $	<p>O: 실측치 P: 모의치 $O(peak)$: 실측 유량의 첨두 값 $P(peak)$: 모의 유량의 첨두 값 \bar{O}: 실측치의 평균 \bar{P}: 모의치의 평균</p>
SSR	$Z = \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2$	
PE	$Z = 100 \left \frac{P(peak) - O(peak)}{O(peak)} \right $	
P-RMSE	$Z = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \left(\frac{O_i - \bar{O}}{2\bar{O}} \right) \right\} \right]^{1/2}$	
R ²	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$	
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2}$	
RSR	$RSR = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]}$	
nRMSE	$nRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \times \frac{100}{\bar{O}}$	
RMAE	$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2}{\bar{O}}$	
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	
d	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	
RB	$RB = \frac{\bar{P} - \bar{O}}{\bar{O}}$	
PBIAS	$PBIAS = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i) \right]}$	

이상의 통계적 지표에 대한 평가 분류 기준 중 Moriasi et al. (2007)이 월단위에 대해 제시한 기준이 최근까지 국내외적으로 많이 이용되고 있으며, <표 3-4-2>와 같다. 일반적으로 모의결과는 시간간격이 짧을수록 통계적 변량이 낮게 나타나기 때문에 일단위에 대해 적용해도 무방하다 (Engel et al., 2007).

<표 3-4-2> 월단위 통계 지표 평가 분류 기준 (Moriasi et al., 2007)

Performance Rating	<i>RSR</i>	<i>NSE</i>	
Very good	$0.00 < RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	
Performance Rating	<i>PBIAS</i> (%)		
	Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

다. 제약조건

최적화 기법을 이용하여 수문모형의 매개변수를 보정할 때, 가장 많이 발생하는 오류는 매개변수의 물리적인 범위를 벗어난 값을 최적해로 준다는 것이다. 예를 들어, 유역면적이 작아서 도달시간이 30분미만으로 추정되는 유역의 도달시간이 5시간 이상으로 결정되는 등의 오류를 의미한다. 이러한 경우 최적화 모형의 사용자가 결정변수, 즉 최적화하고자 하는 매개변수의 범위를 제약조건으로 처리할 수 있다.

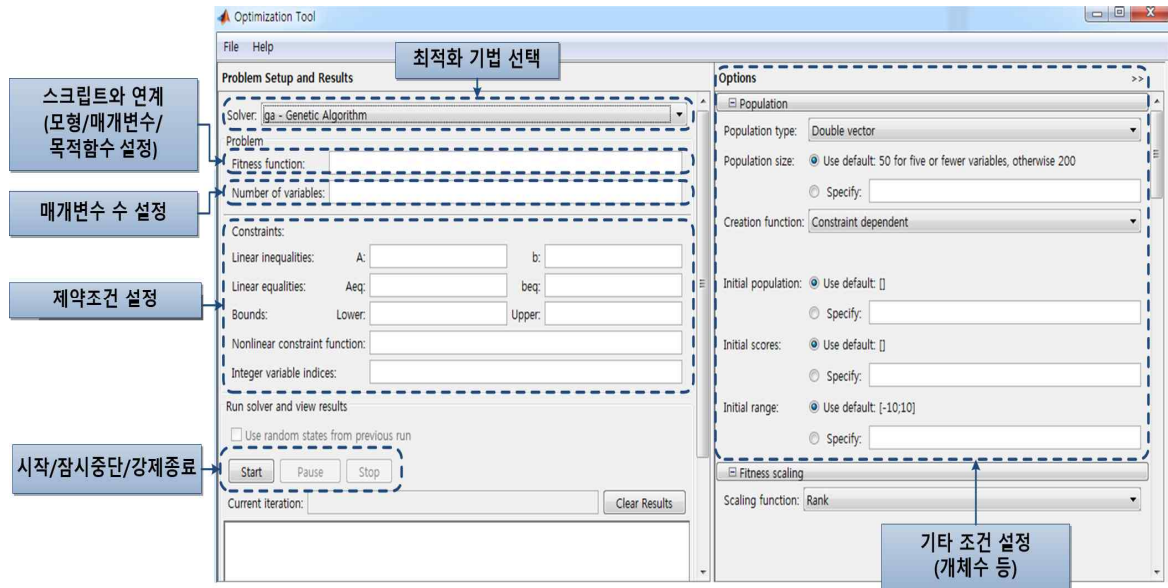
그러나 유전자 알고리즘이나 SCE-UA와 같은 전역최적화 기법과 같이 제약조건을 다루기 어려운 알고리즘을 사용하는 경우에는 제약조건을 위반하는 경우에 목적함수에 벌점 (penalty)을 크게 가하여, 목적함수 값이 커지게 함으로써 (오차의 최소화인 경우) 해당 매개변수 값이 선택되지 않도록 하는 방법을 가장 많이 사용한다 (Rao, 2009).

2.2. 최적화 모듈의 개발

본 연구에서는 MATLAB에서 제공하는 최적화 인터페이스를 기반으로 매개변수를 최적화 하는 모듈을 개발하였다. MATLAB은 MathWorks사에서 개발한 수치 해석 및 프로그래밍 환경을 제공하는 공학용 소프트웨어이다. MATLAB은 수치 계산이 필요한 과학 및 공학 분야에서 다양하게 사용되고 있으며, 최적화 기법, 신호처리, 영상 처리 등의 여러 알고리즘을 내장하고 있어 사용자가 손쉽게 해당 알고리즘을 이용할 수 있는 장점이 있다.

(그림 3-4-6)은 최적화 모듈의 화면을 보여주고 있으며, 최적화기법을 선택하는 부

분, 목적함수 설정 부분, 최적화 대상 매개변수 갯수 설정 부분, 제약조건 설정 부분, 그리고 기타 조건에 대한 설정 부분 등으로 구성되어 있다.



(그림 3-4-6) 최적화 모듈의 화면 및 구성

매개변수 최적화 모듈에서는 앞서 기술한 선형계획법, 비선형계획법, 전역최적화기법 중 대표적인 최적화기법에 대해 사용자가 비교적 쉽게 이용할 수 있도록 제공하고 있다. 본 절에서는 최근에 국내외 연구자들이 매개변수 보정을 위해 많이 이용하는 유전자알고리즘 기법을 중심으로 작성하였다. 유전자 알고리즘 적용을 위한 모형으로는 저수지 유입량 모듈 (수정 3단 Tank 모형)을 선정하였다.

최적화기법을 이용하여 저수지 유입량 모듈의 매개변수를 보정하기 위해서는 우선 보정 매개변수와 목적함수를 지정해야 한다. 매개변수 최적화 모듈에서는 보정을 위한 매개변수와 목적함수를 별도로 입력하는 부분이 없으며, 'Fitness function' 부분에 매개변수와 목적함수를 지정한 스크립트문의 이름을 입력하여 스크립트 문과 연동할 수 있도록 구성하였다.

수정 3단 TANK 모형의 주요매개변수는 (그림 3-4-7)과 같이 A11, A12, A2, A3, H11, H12, H2, B1, B2, B3, ST3 등이며 본 연구에서는 모두 보정 매개변수로 지정하였다. 만약 사용자가 일부의 매개변수만을 보정의 대상으로 지정하고자 한다면, 스크립트 문에서 해당 매개변수만을 지정해주면 된다. 목적함수로는 식 (3-4-5)에서 기술한 바와 같은 SSR (오차 제곱의 총합)로 선정하였다. (그림 3-4-7)은 스크립트 문에서 지정한 보정매개변수, 목적함수, 그리고 매개변수 최적화 모듈의 연동을 보여주고 있다. 'Fitness function'의 입력형식은 '@스크립트이름'이며, 'Number of variables'에는 보정 매개변수의 갯수를 입력해야 한다.

제약조건의 설정은 (그림 3-4-8)과 같이 'Constraints'에서 이루어진다. 'Constraints'에서 'Linear inequalities'와 'Linear equalities'는 매개변수 간의 관계가 선형인 경우 설정하는 제약조건이다. 만약 x_1, x_2, x_3, x_4 라는 매개변수에 대해 ' $x_1 + 2x_2 + 3x_3 \leq 40$ ', ' $2x_1 + x_3 + 4x_4 \leq 90$ ' 이라는 제약조건이 주어진 경우, 이 관계를 $Ax \leq b$ (A는 매개

변수의 계수에 관한 행렬, x 는 매개변수 벡터, b 는 우변에 위치한 계수의 벡터)로 표시할 수 있으며 A 에 해당하는 행렬을 'Linear inequalities'의 'A' 부분에, b 에 해당하는 벡터를 'b'에 입력하면 된다. 이 때 행렬과 벡터의 열과 열의 구분은 공백으로 행과 행의 구분은 ';'을 통해 표시한다. 즉 앞선 예시의 경우 'A' 부분에는 '1 2 3 0; 2 0 1 4'를 입력하면 되고, 'b' 부분에는 '40; 90'을 입력하면 된다. 수정 3단 TANK 모형의 매개변수는 각각 독립적이므로 'Linear inequalities'와 'Linear equalities'를 설정하지 않았다.

function fitness=TANK_GA(x)

A11= x(1);
A12 = x(2);
A2 = x(3);
A3 = x(4);
H11 = x(5);
H12 = x(6);
H2 = x(7);
B1 = x(8);
B2 = x(9);
B3 = x(10);
ST3= x(11);

스크립트 문과의 연동

매개변수 지정

Tank 모형 코드

-fitness=sum(error.data.^2); 목적함수

Solver: ga - Genetic Algorithm

Problem

Fitness function: @TANK_GA

Number of variables: 11

(그림 3-4-7) 최적화 모듈과 스크립트 문의 연계

Constraints:			
Linear inequalities:	A:		b:
Linear equalities:	Aeq:		beq:
Bounds:	Lower:	[0 0 0.03 0.005 5 5 0 0 0.01 0.005 10]	Upper: [0.5 0.5 0.1 0.1 60 60 50 0.5 0.1 0.1 400]
Nonlinear constraint function:			
Integer variable indices:			

(그림 3-4-8) 최적화 모듈에서의 제약조건의 설정 화면

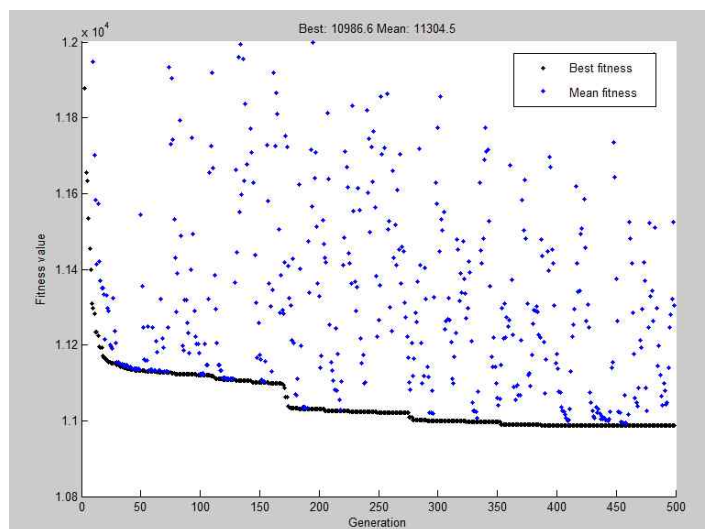
수문모형에서는 일반적으로 각 매개변수의 최솟값과 최댓값에 대한 제약조건을 설정해야 하며, 'Bounds'의 'Lower'에 매개변수의 최솟값을 입력하고 'Upper'에 최댓값을 입력하여 설정할 수 있다. 여기서, 주의할 점은 앞선 스크립트 문에서 지정한 매개변수의 순서대로 최솟값과 최댓값을 입력해야 한다.

'Integer variable indices'는 정수인 매개변수를 설정하는 부분으로, 스크립트 문에서 지정한 매개변수의 번호를 입력하면 해당 매개변수는 정수로 보정이 이루어진다. 수정

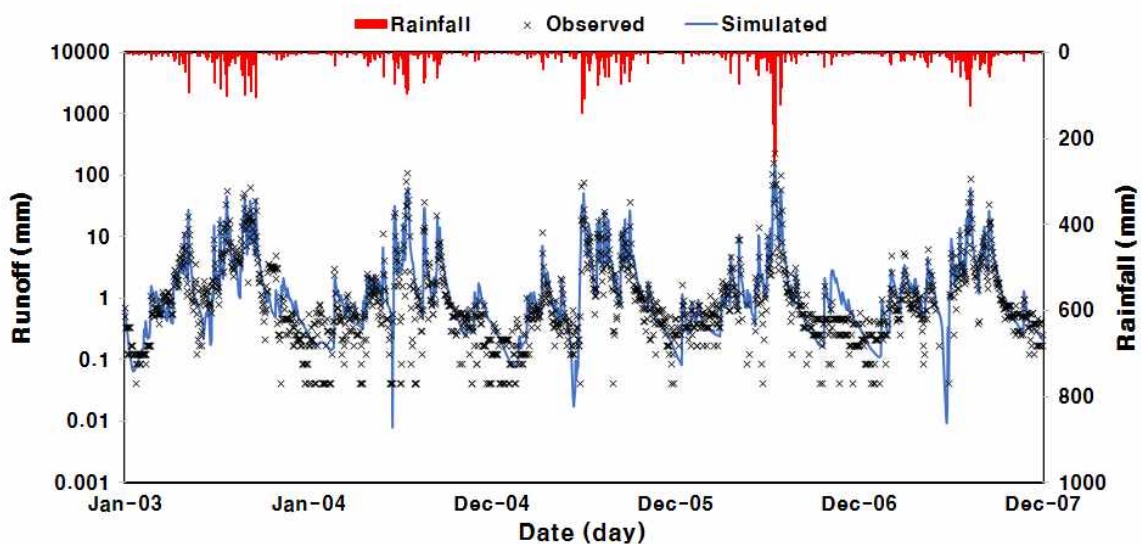
3단 TANK 모형에서는 모든 매개변수가 실수이므로 이를 설정하지 않았다. 정수 매개변수 설정은 농업용수 공급량 모의 시 이양기, 본답기, 중간낙수기 등의 날짜를 보정할 경우 유용할 수 있을 것으로 사료된다.

‘Optimization Toolbox’의 ‘Options’에서는 유전자 알고리즘의 경우 ‘Population size’, ‘Selection function’, ‘Mutation function’, ‘Stopping criteria’ 등을 설정할 수 있다.

수문모형의 제약조건 및 목적함수 설정을 완료 후 ‘Start’를 클릭하면 유전자알고리즘을 이용한 매개변수 보정 최적화가 실행된다. (그림 3-4-9)는 보정이 완료된 매개변수와 진화가 진행됨에 따라 최적해가 수렴하는 모습을 보여주고 있다. 본 절에서 홍성구역의 2003 - 2007년 대해 매개변수를 보정했으며 (그림 3-4-10)과 같이 실측치와 모의치가 유사하게 보정이 이루어졌으며, 통계적인 변량인 R^2 는 0.79, NSE는 0.78로 나타났다.



(그림 3-4-9) 유전자 알고리즘기법에서 세대에 따른 목적함수의 변화



(그림 3-4-10) 최적화 기법 모듈의 수정 3단 Tank 모형 적용 결과 (홍성구역, 2003-2007)

3. 최적화 모듈의 적용성 평가

앞서 개발한 최적화 모듈의 적용성 평가를 위해 보령댐, 밀양댐, 황성댐, 용담댐 유역을 대상유역으로 선정하여 모형의 보정 및 검정을 실시하였다. 2007 ~ 2009년의 유출량 실측자료를 이용하여 매개변수 최적화를 실시하였으며, 2010 ~ 2012년의 자료를 이용하여 검정을 실시하였다. <표 3-4-3>은 대상유역의 유역특성을 나타내고 있다. 모형의 평가 지표로 R^2 , NSE, RMSE를 선정하여 평가에 이용하였다.

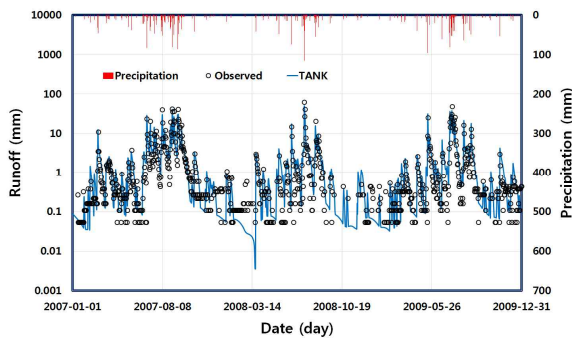
<표 3-4-3> 대상유역의 면적, 유로장, 유역경사

대상유역	유역면적 (km ²)	유로장 (km)	유역경사 (%)
보령댐	161.59	22.30	30.05
밀양댐	93.98	28.06	41.65
황성댐	207.88	28.71	30.69
용담댐	922.62	62.60	27.52

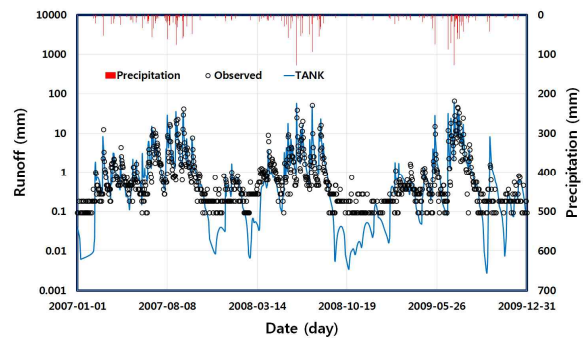
3.1. 유전자알고리즘을 이용한 매개변수최적화

가. 모형의 보정

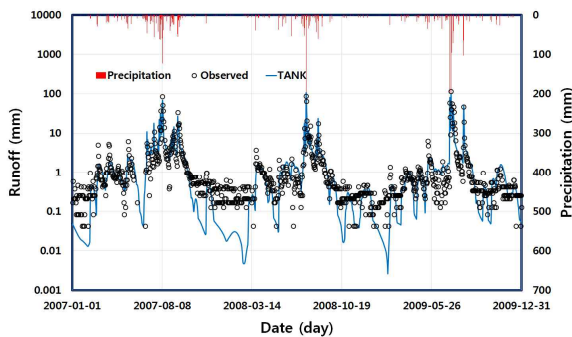
최적화 모듈로 유전자알고리즘을 선택하여 TANK 모형의 매개변수최적화를 하였다. <표 3-4-4>는 보정결과의 통계적 변량을, (그림 3-4-11)은 유역별 유출량 모의결과를, (그림 3-4-12)는 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 보정결과 R^2 는 0.78 ~ 0.89, NSE는 0.77 ~ 0.89, RMSE는 2.10 ~ 2.48 mm의 범위로 나타났다. 비록 기저유출에 대하여 모의치가 실측치와 차이가 나타났으나, 통계적 변량과 (그림 3-4-11), (그림 3-4-12)를 통해 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 사료된다.



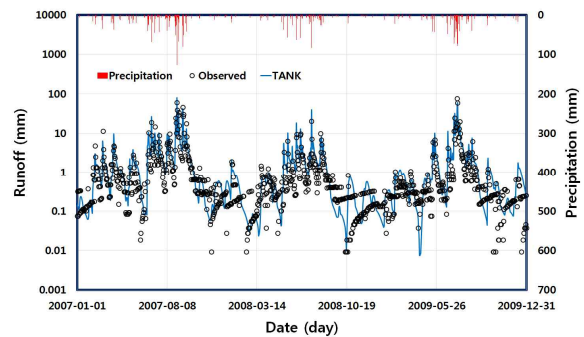
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역

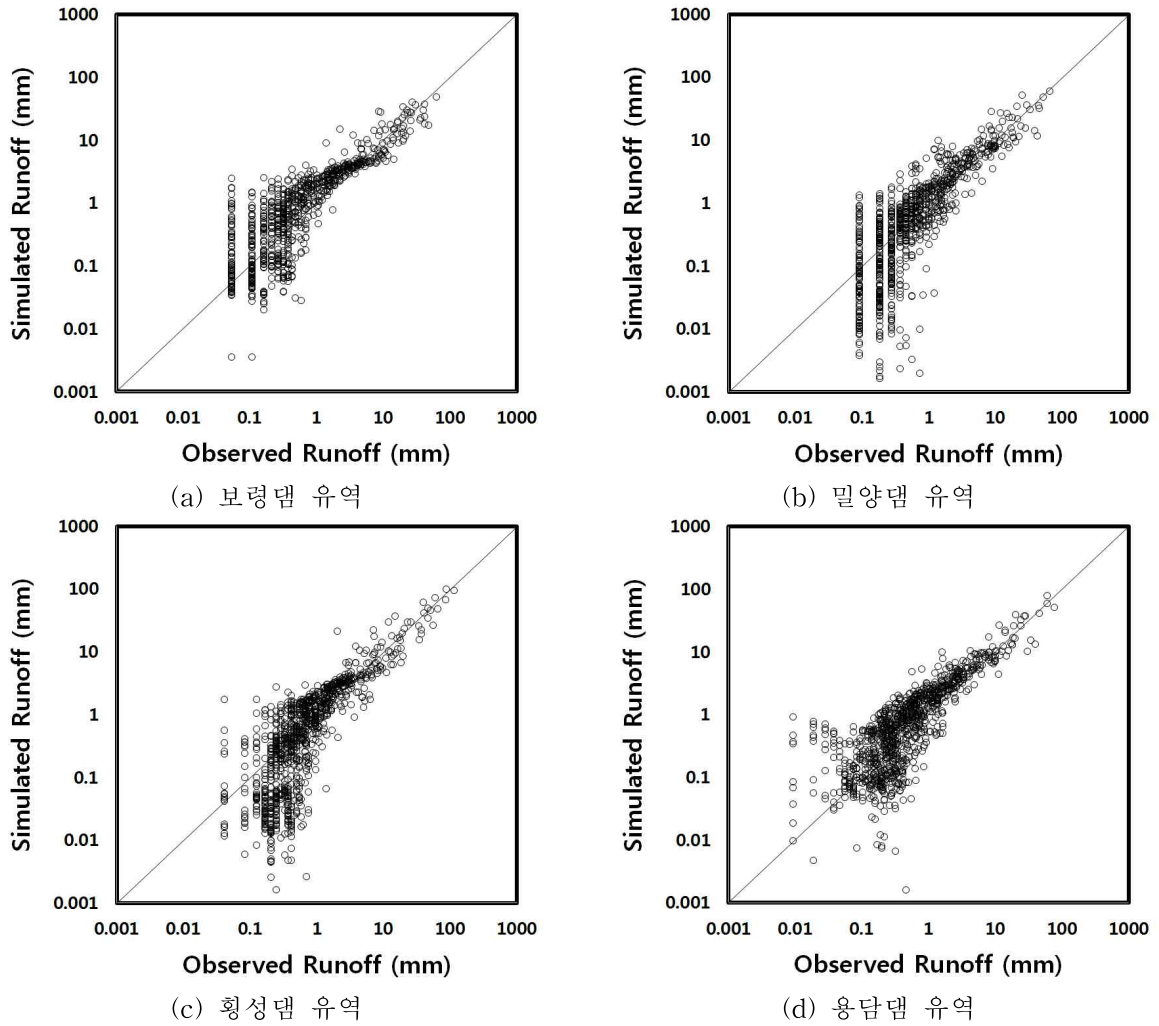


(c) 황성댐 유역



(d) 용담댐 유역

(그림 3-4-11) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 보정결과



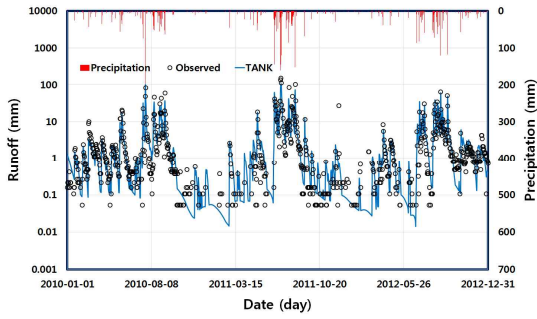
(그림 3-4-12) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 산포도

<표 3-4-4> 유역별 실측치와 모의치의 통계적 변량 (GA)

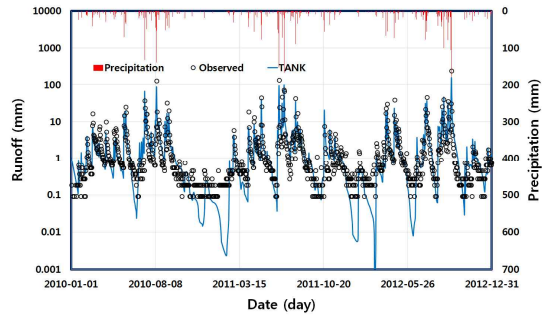
	보정기간				검정기간			
	보령	밀양	횡성	용담	보령	밀양	횡성	용담
R^2	0.80	0.78	0.89	0.83	0.74	0.87	0.82	0.83
RMSE	2.32	2.28	2.48	2.10	5.47	4.24	2.95	3.43
NSE	0.79	0.77	0.89	0.82	0.74	0.85	0.82	0.83

나. 모형의 검정

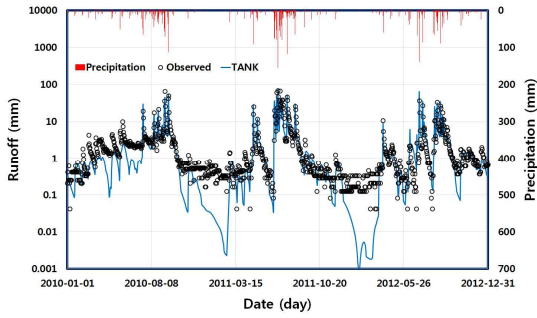
최적화된 매개변수 결과를 바탕으로 모형의 검정을 실시하였다. <표 3-4-4>는 검정 결과의 통계적 변량을, (그림 3-4-13)은 유역별 유출량 모의결과를, (그림 3-4-14)는 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 검정결과 R^2 는 0.74 ~ 0.87, NSE는 0.74 ~ 0.85, RMSE는 2.95 ~ 5.47 mm의 범위로 나타났다. 검정기간 동안 보정된 매개변수는 실측치와 모의치의 유사하게 나타났다.



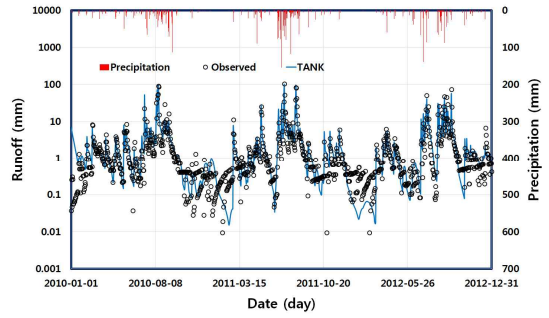
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역

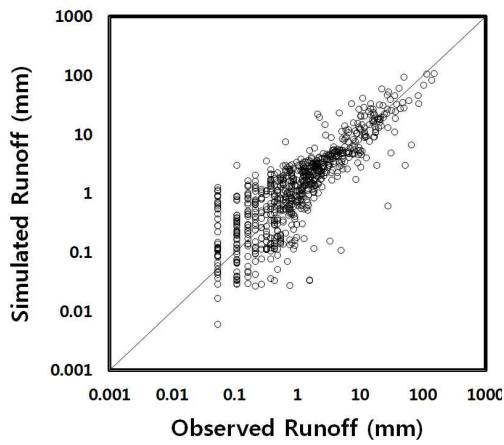


(c) 횡성댐 유역

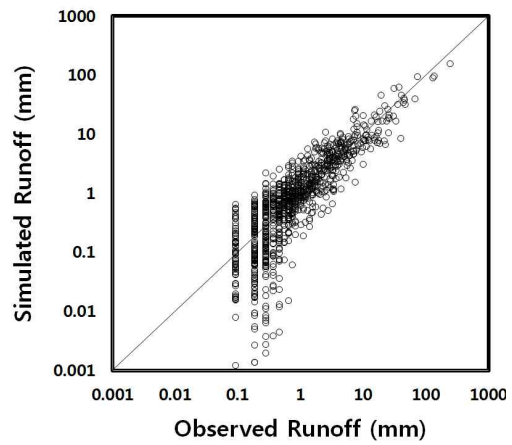


(d) 용담댐 유역

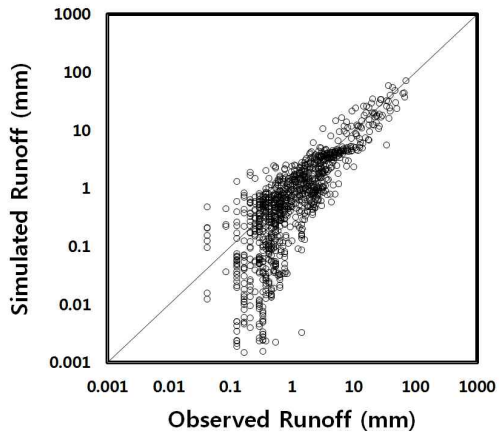
(그림 3-4-13) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 검정결과



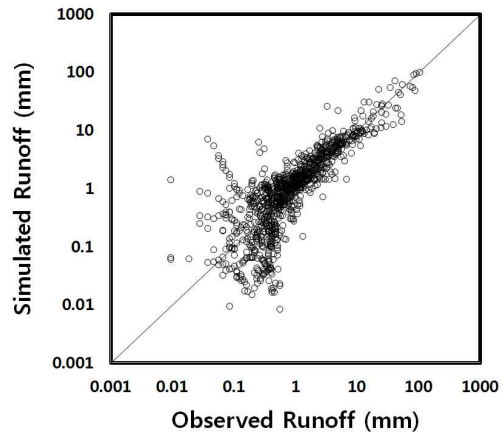
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역



(c) 횡성댐 유역



(d) 용담댐 유역

(그림 3-4-14) GA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 모의치와 실측치의 산포도

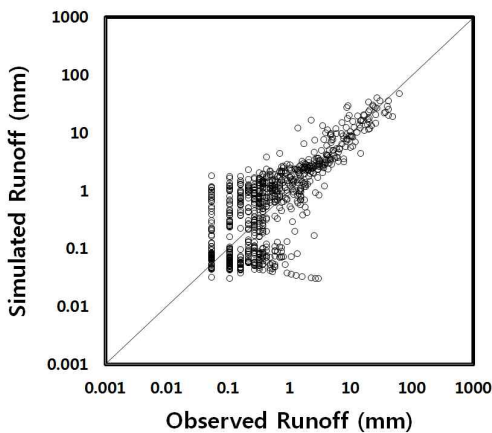
3.2. SA를 이용한 매개변수최적화

가. 모형의 보정

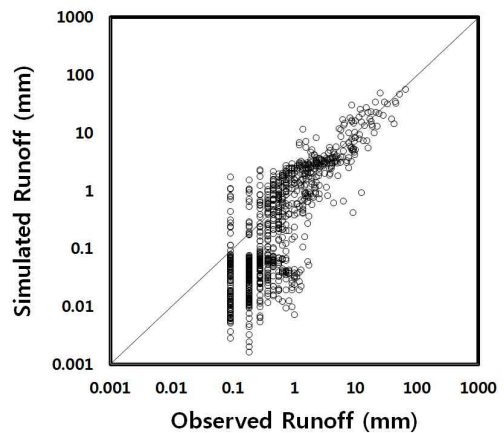
최적화 모듈로 SA를 선택하여 TANK 모형의 매개변수최적화를 하였다. <표 3-4-5>는 보정결과의 통계적 변량을, (그림 3-4-15)는 실측치와 모의치의 산포도를, (그림 3-4-16)은 유역별 유출량 모의결과를 나타내고 있다. 보정결과 R^2 는 0.78 ~ 0.89, NSE는 0.77 ~ 0.88, RMSE는 2.09 ~ 2.52 mm의 범위로 나타났다. 비록 기저유출에 대하여 모의치가 실측치와 차이가 나타났으나, 통계적 변량과 (그림 3-4-15), (그림 3-4-16)을 통해 모의치는 실측치의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 사료된다.

<표 3-4-5> 유역별 실측치와 모의치의 통계적 변량 (SA)

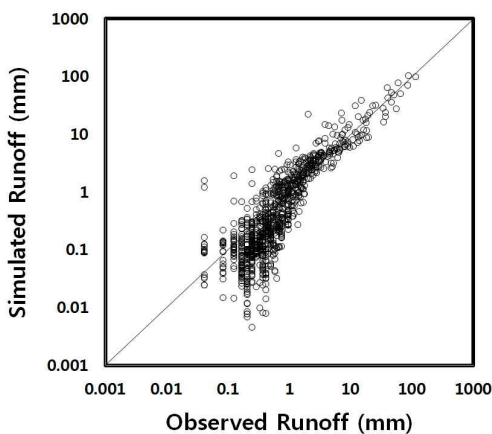
	보정				검정			
	보령	밀양	횡성	용담	보령	밀양	횡성	용담
R^2	0.80	0.78	0.89	0.83	0.73	0.83	0.82	0.86
RMSE	2.31	2.28	2.52	2.09	5.56	4.82	2.97	3.15
NSE	0.80	0.77	0.88	0.82	0.73	0.80	0.81	0.86



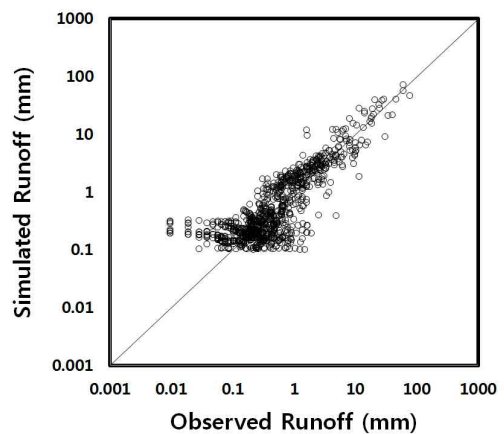
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역

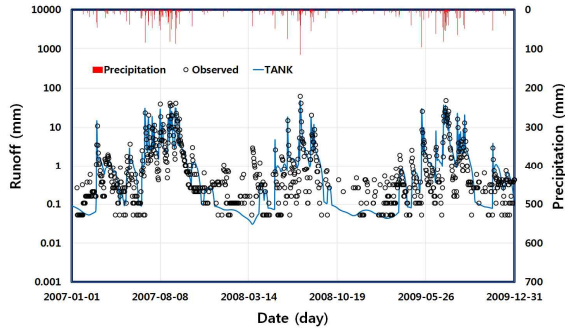


(c) 횡성댐 유역

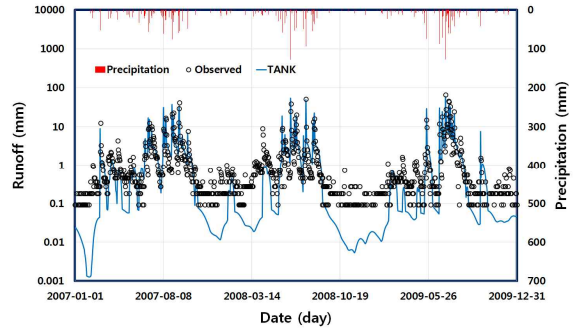


(d) 용담댐 유역

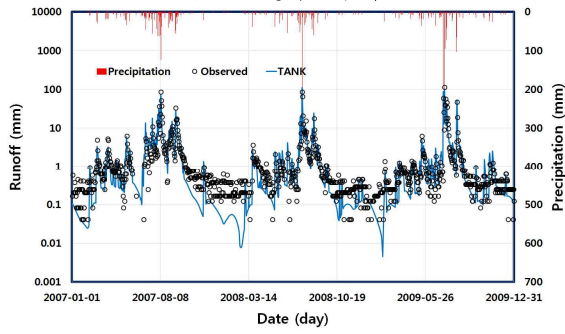
(그림 3-4-15) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 모의치와 실측치의 산포도



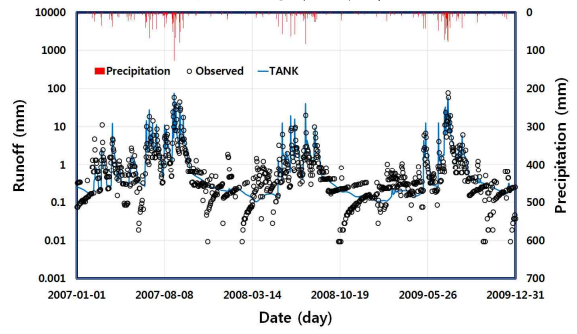
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역



(c) 횡성댐 유역

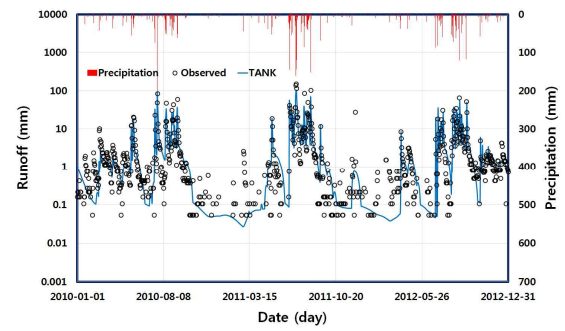


(d) 용담댐 유역

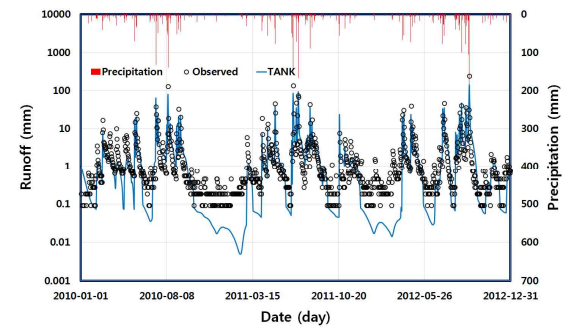
(그림 3-4-16) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 보정결과

나. 모형의 검정

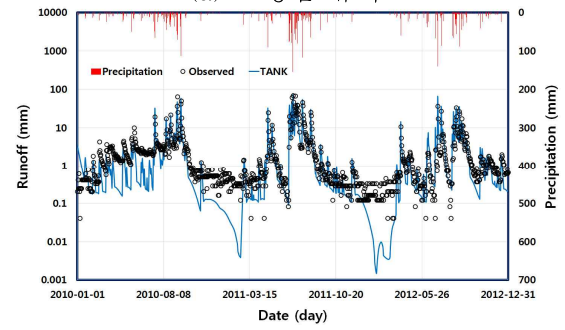
최적화된 매개변수 결과를 바탕으로 모형의 검정을 실시하였다. <표 3-4-5>는 검정 결과의 통계적 변량을, (그림 3-4-17)은 유역별 유출량 모의결과를, (그림 3-4-18)은 실측치와 모의치의 산포도를 나타내고 있다. 검정결과 R^2 는 0.73 ~ 0.86, NSE는 0.73 ~ 0.86, RMSE는 2.97 ~ 5.56 mm의 범위로 나타났다. 검정기간 동안 보정된 매개변수는 실측치와 모의치의 유사하게 나타났다.



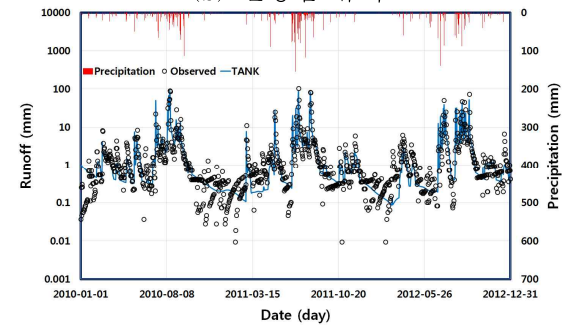
(a) 보령댐 유역



(b) 밀양댐 유역

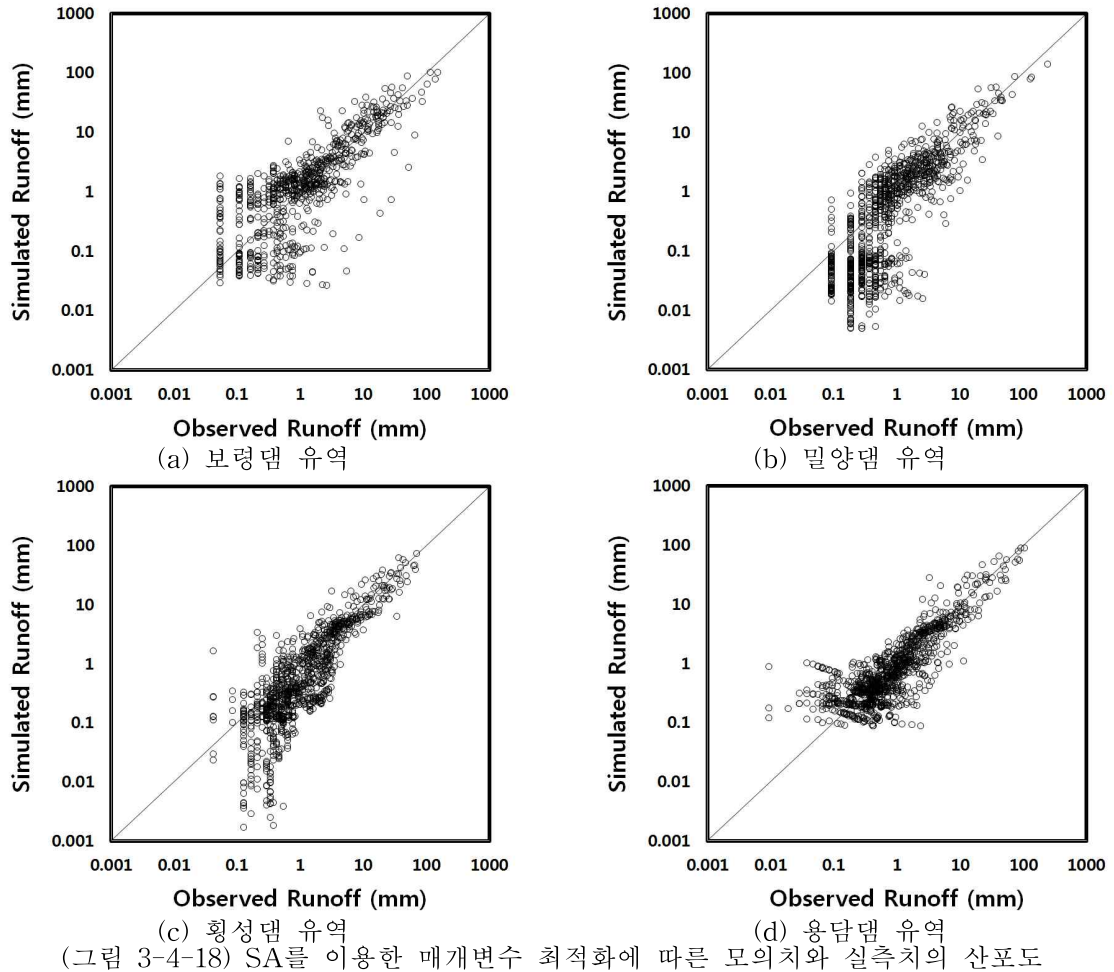


(c) 횡성댐 유역



(d) 용담댐 유역

(그림 3-4-17) SA를 이용한 매개변수 최적화에 따른 유역별 유출량 검정결과



3.3. 매개변수 최적화 기법에 따른 유출량 결과 비교

가. 통계적 변량의 비교

유전자알고리즘과 SA를 이용하여 TANK 모형의 매개변수 최적화를 하고 유출량 모의를 실시하였다. 각각의 모의결과에 대한 통계적 변량은 <표 3-4-4>와 <표 3-4-5>에 나타내었다. 용담댐 유역을 제외하고 GA를 이용하여 최적화를 하였을 때 더 나은 통계적 변량을 나타냈으며, 용담댐 유역에서는 SA를 이용하여 최적화한 모의치가 더 나은 값을 나타냈다. 한편 기존의 연구 결과에 의하면 강민구 등 (2013)은 24개의 저수지유역을 대상으로 모의 결과 RMSE는 2.7 ~ 10.2 mm, R^2 가 0.77 ~ 0.91의 범위를 나타내는 것으로 보고하였고, 이성용 등 (2009)은 발안 유역에 대한 모의 결과 R^2 가 0.84, 0.86의 값을 나타내는 것으로 보고하는 등 본 연구결과는 선행연구의 범위와 유사한 것으로 나타났다.

나. 연 유출량 비교

<표 3-4-6>은 검정기간동안 유역별 연평균 유출량을 비교한 결과이다. 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화하였 경우 연평균 유출량은 실측치의 76% ~ 101%의 범위 내에서 모의되었으며, SA를 이용하여 최적화하였을 때 79% ~ 102%의 범위에서 모의하였다. 두 모형 모두 실측치와 유사한 범위 내에서 모의되었으나 유역에 따른 차이가 나타났다.

<표 3-4-6> 유역별 연평균 유출량 모의 값

	보령	밀양	횡성	용담
실측치	1130.0	996.1	1041.1	1001.5
GA	1143.1	984.5	857.6	1054.8
SA	1148.0	902.9	891.0	925.6

4. 요약 및 결론

본 장에서는 COMFARM 기반의 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 모형의 매개변수를 최적화하는 모듈을 개발하였으며, 그 적용성을 평가하였다. 본 장에서의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 매개변수 최적화 모듈에서는 최적화 기법으로 선형계획법, 비선형계획법, SCE-UA, 유전자 알고리즘, ACO, PSO, Simulated Annealing 등을 지원하며 그 기법에 대해 정리하였다.
- ② 매개변수 최적화 모듈에서는 목적함수식으로 SAE, SSR, PE, PBIAS, RMSE, RSR, nRMSE, P-RMSE, R^2 , RB, NSE, d 등을 지원하며 그 구성 식에 대해 기술하였다.
- ③ 최적화 모듈의 인터페이스는 최적화기법 선택 부분, 목적함수 설정 부분, 최적화 대상 매개변수의 갯수 설정 부분, 제약조건 설정 부분, 그리고 기타 조건 설정 부분 등으로 구성되어 있다.
- ④ 최적화 모듈을 실행하고 적용하는 방법을 저수지 유입량 모듈을 대상으로 매개변수를 최적화하는 과정 (목적함수 설정방법, 제약조건 설정방법)을 기술하였다.
- ⑤ 개발된 최적화 모듈의 적용성을 평가하기 위하여 최적화 기법으로 유전자 알고리즘과 Simulated Annealing 기법을 선택하였으며, 각 기법을 보령댐, 밀양댐, 횡성댐, 용담댐 유역의 2007 ~ 2009년 유출량 실측자료를 대상으로 저수지 유입량 모듈을 보정 및 검정하였다.
- ⑥ 유전자 알고리즘을 이용하여 보정된 매개변수는 검정기간동안 연평균 유출량은 실측치의 76 ~ 101% 범위에서 모의되었으며, R^2 는 0.74 ~ 0.87의 범위를, RMSE는 2.95 ~ 5.47 mm의 범위를, NSE는 0.74 ~ 0.85의 범위를 갖는 것으로 나타났다.
- ⑦ Simulated Annealing 기법을 통해 보정된 매개변수는 검정기간동안 연평균 유출량은 실측치의 79 ~ 102% 범위에서 모의되었으며, R^2 는 0.73 ~ 0.86의 범위를, RMSE는 2.97 ~ 5.56 mm의 범위를, NSE는 0.73 ~ 0.86의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 매개변수 최적화 모듈은 COMFARM의 컴포넌트로서 물순환 해석 요소 기술 모형인 저수지 유입량 모형, 저수지 물수지 해석 모형, 저수지 하류 관개지구 모형, 그리고 저수지 하류 하천유량 모의 모형 등과 연계가 가능하다.

제 5 절 농촌용수 관리 의사결정지원 기술 개발

1. 서론

전체 물수요량의 50% 이상을 차지하는 농업용수는 자연적, 사회적, 인위적인 요인에 의해 사용 가능한 수자원의 공급비율이 감소하는 추세이다. 이를 고려하면 기존의 용수 자원을 효율적으로 활용하는 방안을 강구할 필요가 있으며 합리적 물관리가 필요하다 (정하우 등, 2006).

합리적 농업수자원 관리를 위해서는 미래 기후변화 및 이에 따른 기상/지형/영농과 소비수량, 유효수량, 그리고 토지이용변화까지 고려되어야 하며 (Yoo et al., 2013), 단순한 해석이 불가능하기 때문에 복합적인 해석이 가능한 해석 시스템 구축이 필요하다.

한편, 최근에는 농촌지역의 생활용수, 공업용수, 농업용수, 수산용수 등과 함께 농촌용수의 범주에 포함되며, 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 하천 유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 뜻하는 환경용수에 대한 관심이 대두되고 있으며, 이에 대한 고려가 필요하다 (김상민 등, 2011). 최근 건설된 독높이기 농업용 저수지는 농업용수 및 환경용수 공급이라는 두 가지 이상의 목적을 수행할 수 있다. 하지만 독높이기 사업을 시행하지 않은 저수지의 하류유역 또한 하천생태계의 보전을 위한 환경용수 공급이 중요하며, 추가 저수량 확보 없이 환경용수 공급을 위한 방안이 필요하다. 한편, 우리나라는 설계시 농경지 면적에 비해 전작 등으로 농경지가 감소한 실정이다. 이에 농경지 면적의 감소에 따라 기존에 농업용수로 쓰이던 용수가 환경용수로 이용될 수도 있을 것이다.

논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 비점오염의 배출 양상이 다양하며 부영양화의 주원인으로 보고되고 있다 (송정현 등, 2012; Chung et al., 2003). 논 비점오염 관리를 위해서는 발생원 관리가 가장 효과적으로 알려져 있으며, 특히, 시비 효율 향상, 효율적인 물관리 등 다양한 영농방법 개선을 통한 비점오염원 발생 저감 방안 개발이 요구 되고 있다 (강문성, 2010; 송정현 등, 2012). 지난 수십년간 CREAMS-PADDY 모형 및 PADDIMOD 모형 등 국내외에서 많은 논 비점오염 모형이 개발되어 왔다 (서춘석 등, 2002; 전지홍 등, 2004). 하지만 이들 모형은 포장단위 모형으로 유역단위에서의 오염부하량 저감효과를 평가하기에는 한계가 있다.

본 절에서는 농촌용수 관리 의사결정지원 기술로써 ① 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술, ② 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술, 그리고 ③ 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석 지원 기술 등을 개발하고자 한다.

2. 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술 개발

미래 기후변화는 인간의 활동 증가에 따른 온실가스 증가로 인한 온도 상승이 이루어지고 있고 이로 인한 기후시스템의 변화에 의하여 강우 등 전반적인 기상인자가 변

화하게 되는 것이다. 이와 같은 기상의 변화는 온도와 강우뿐만 아니라 습도, 풍속, 그리고 일사량의 변화도 동반하고 있으며, 이에 영향을 받는 농업수자원의 수요는 온도와 강우의 증가 요인만 고려하여 평가하기에는 한계가 있다 (최진용 등, 2013).

농업용수 수요량 산정에는 작물소비수량, 유효수량, 영농방식, 그리고 물관리 방법을 고려해야 하며, 이들 요소는 기후변화에 따른 기후인자에 대부분 영향을 받기 때문에 이와 같은 영향을 복합적으로 고려하여 미래 농업용 저수지 등 농업수자원의 수요에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

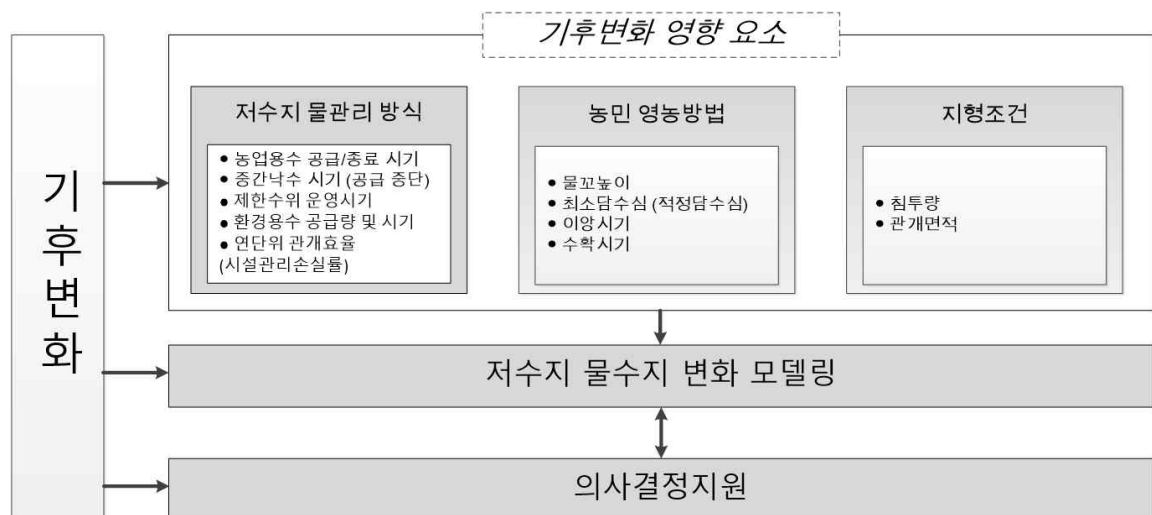
본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 농업용수 수요량 변화가 농업용 저수지의 물수지에 미치는 영향을 해석/분석하는 의사결정지원 기술을 COMFARM 기반으로 개발하고 그 적용성을 평가하고자 한다.

2.1 기후변화 시나리오에 따른 저수지 물수지 해석지원 기술 개발

기후변화는 기상 요인에 영향을 미치며, 이에 따라 농업수자원의 다양한 요소가 영향을 받는다. 기온 상승은 소비수량 증가로 이어지며, 생육기간이 변할 수도 있으며 단축된 생육기간은 이모작이 가능하도록 이앙시기가 늦어질 수도 있다 (최진용 등, 2013). 강우의 증가는 절대량의 증가와 강우 빈도의 증가로 나타낼 수 있는데, 유효수량이 증가하여 관개용수 필요량이 감소할 수 있다. 이외에 습도/풍속/일사량 등의 변화 또한 소비수량 등에 영향을 미친다. 더불어 기후변화에 따라 관개면적이 변화할 수 있으며, 이는 농업용수 공급량에 영향을 미친다.

이상과 같이 농업수자원에 대한 기후변화 영향 평가는 기상/지형/영농과 소비수량, 유효수량, 그리고 토지이용변화까지 고려되어야 하며 (Yoo et al., 2013), 단순한 해석이 불가능하기 때문에 복합적인 해석이 가능한 해석 시스템 구축이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화와 기상/지형/영농 등 관련 요소 변화에 따른 농업용 저수지 물수지 변화를 해석할 수 있는 의사결정지원시스템을 개발하였다 (그림 3-5-1).

본 연구 개발 시스템을 이용하여 사용자는 기후변화에 따른 영농시기변화/토지이용변화/물관리 방식 변화 등에 따른 농업용 저수지 물수지 변화를 해석할 수 있다.



(그림 3-5-1) 기후변화 시나리오에 따른 저수지 물수지 해석 지원기술

2.2 기후변화 시나리오에 따른 저수지 물수지 해석지원 기술 적용

가. 기후변화 자료

본 연구에서는 박지훈 등 (2012)이 편의보정한 강수량 자료와 기상청에서 제공하는 기상자료를 이용하였다. 상기 자료는 본 연구 개발 자료관리시스템에 내재되어 있다. 미래 기후자료는 기상청에서 국가표준 기후변화 시나리오로 선정하여 제공하고 있는 RCP 시나리오를 사용하였다. 국립기상연구소는 전지구 기후모형 (General Circulation Model, GCM)인 HadGEM2-AO 모형에 RCP 시나리오를 입력자료로 사용하여 약 135 km 해상도를 가지는 전지구 기후변화 시나리오를 산출한 것으로, 이 값을 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA 모형에 입력자료로 사용하여 12.5 km 해상도를 가지는 지역 기후변화 시나리오가 산출되었다. 국립기상연구소에서 산출한 지역기후변화 시나리오는 과거강수모의 (1950~2005년) 자료와 RCP 시나리오에 기반한 미래강수모의 (2006~2100년) 자료로 나누어서 제공되며 본 연구에서는 1976~2100년 동안의 자료를 사용하였다. 편의보정은 과거 1990s 기간 동안 3시간동안의 누적 강수량이 0.1 mm 이상인 사상의 모의치와 관측치를 분위사상법을 이용하여 실시된 것으로, 분위사상법을 실시하기 위한 확률분포형은 GEV (Generalized Extreme Value, GEV) 분포이다. GEV 분포의 매개변수 최적화는 모의치와 관측치의 정상 연평균강수량 (Normal annual precipitation)의 오차가 10 % 이내로 만족할 때까지 수행된 것으로, 이후 강우일수가 보정되었다. 과거 1990s 기간 동안의 강수량 자료에 대한 편의보정을 실시하여 구한 매개변수를 미래 기간 (2025s, 2055s, 2085s)에 일괄적으로 적용하여 미래 강수량의 편의보정을 실시하였다. (박지훈 등, 2012; 박지훈 등, 2013).

나. 대상지구

본 연구에서는 기후변화 시나리오에 따른 저수지 물수지 해석지원 기술 적용 대상지구로 고삼저수지 지구로 선정하였다. 고삼저수지 유역은 이천관측소에 포함되며 수원, 천안관측소와 인접하고 있으나 지형학적으로 수원관측소의 영향을 많이 받는 유역이다. 이양기, 본담기, 중간낙수기 등의 입력자료로 이용되며 한국농어촌공사에서 전국에 대해 조사한 자료 중 인근지역을 선정하여 초기값으로 이용하였다. 상류유역 면적, 논 비율, 밭 비율, 산림 비율, 유역경사, 유역연장, 관개면적, 수위-내용적 곡선, 만수위/사수위/제한수위 등의 입력 정보는 [제 3 장 제 2 절]에 상세히 서술되어 있다. 대상저수지는 [제 3 장 제 2 절]에서 보정 및 검정이 이루어졌으며, 상기 매개변수를 미래에도 적용하였다. 관개효율은 연별로 보정된 2011~2014년의 평균인 80%를 이용하였다.

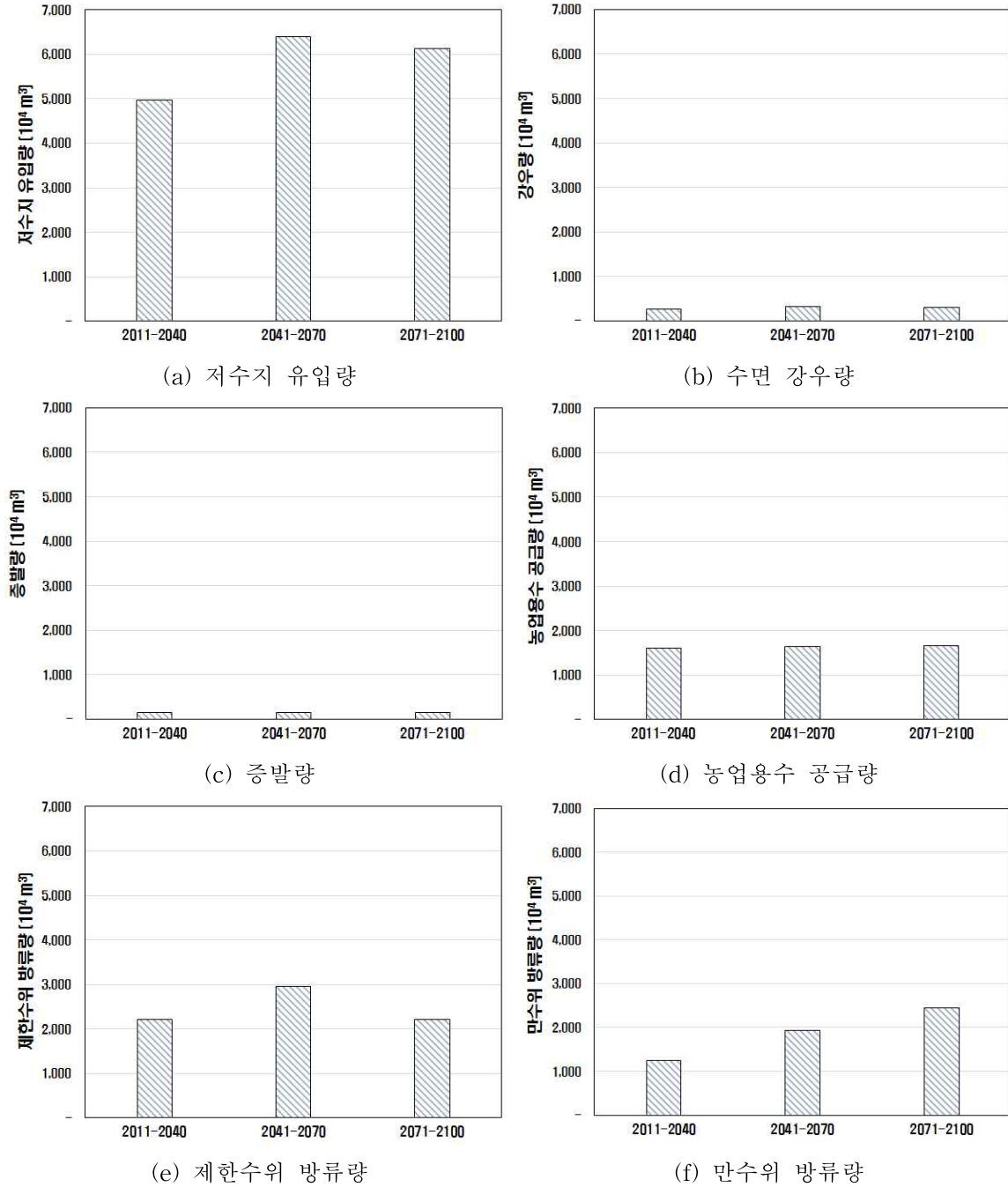
다. 기후변화 시나리오 따른 저수지 물수지

본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오를 적용한 경우의 고삼저수지의 미래 물수지 성분변화를 모의하였으며, 그 결과는 <표 3-5-1> (그림 3-5-2)와 같다.

연구결과는 상기 시스템을 이용하여 쉽게 도출할 수 있었으며, 본 시스템을 통해 기후변화 대응 전략 수립을 위한 다양한 시나리오를 쉽게 모의할 수 있을 것으로 사료된다.

<표 3-5-1> 기후변화에 따른 저수지 물수지 요소

물수지 요소	저수지 유입량 (10 ⁴ m ³)	강우량 (10 ⁴ m ³)	소계 (10 ⁴ m ³)	농업용수 공급량 (10 ⁴ m ³)	제한수위 방류량 (10 ⁴ m ³)	만수위 방류량 (10 ⁴ m ³)	증발량 (10 ⁴ m ³)	소계 (10 ⁴ m ³)
2011-2040 (연평균)	4,977	267	5,244	1,603	2,214	1,247	147	5,211
2041-2070 (연평균)	6,391	322	6,713	1,644	2,960	1,940	156	6,700
2071-2100 (연평균)	6,133	312	6,445	1,668	2,216	2,453	160	6,497



(그림 3-5-2) 기후변화에 따른 저수지 물수지 요소

3. 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술

환경용수는 농촌지역의 생활용수, 공업용수, 농업용수, 수산용수 등과 함께 농촌용수의 범주에 포함되며, 농촌지역의 하천생태계 보전을 위한 하천기능유지는 물론 환경개선 의미를 포함하고 있어 환경과 하천 유지용수를 동시에 만족시키는 용수를 뜻하며, 최근에 그 중요성이 거론되고 있다 (김상민 등, 2011).

최근 건설된 독높이기 농업용 저수지는 농업용수 및 환경용수 공급이라는 두 가지 이상의 목적을 수행할 수 있다. 하지만 독높이기 사업을 시행하지 않은 저수지의 하류유역 또한 하천생태계의 보전을 위한 환경용수 공급이 중요하며, 추가 저수량 확보 없이 환경용수 공급을 위한 방안이 필요하다. 한편, 우리나라는 설계시 농경지 면적에 비해 전작 등으로 농경지가 감소한 실정이다. 이에 농경지 면적의 감소에 따라 기존에 농업용수로 쓰이던 용수가 환경용수로 이용될 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 독높이기 사업을 시행하지 않은 농업용 저수지에 대한 환경용수 공급 확보 방안을 마련하기 위한 의사결정지원기술을 개발하고자 한다.

3.1. 기존 농업용 저수지 환경용수 공급량 추정 지원 기술

본 연구에서는 유승환 등 (2012)의 방법과 같이 비관개기 시점 (10월 1일)의 초기저수량과 관개기 시점 (4월 1일)의 목표저수량을 설정하여 환경용수를 방류하여도 관개기 시점에 목표저수량이 확보되어 농업용수 공급에 지장이 없도록 하는 방류량을 결정하였다.

본 연구 의사결정지원기술의 대상 저수지는 독높이기 사업이 시행되지 않은 기존 저수지의 경우이기 때문에 초기저수량과 목표저수량 모두 기존 만수용량으로 설정하였다. 초기저수량별로 방류기준량을 변화시켜가며 매 관측년의 관개지 시점인 4월 1일 저수량을 모의하며, 그 값의 하위 10% 값이 목표저수량에 근접하면 환경용수 방류량으로 결정한다 (유승환 등, 2012).

관개기의 경우 관개회귀수량, 제한수위 및 물넘이 방류량 등에 의해 하류하천에 다양한 방식으로 수량 확보가 가능하므로 환경용수를 방류하지 않는 것으로 설정하였다.

3.2 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술의 적용

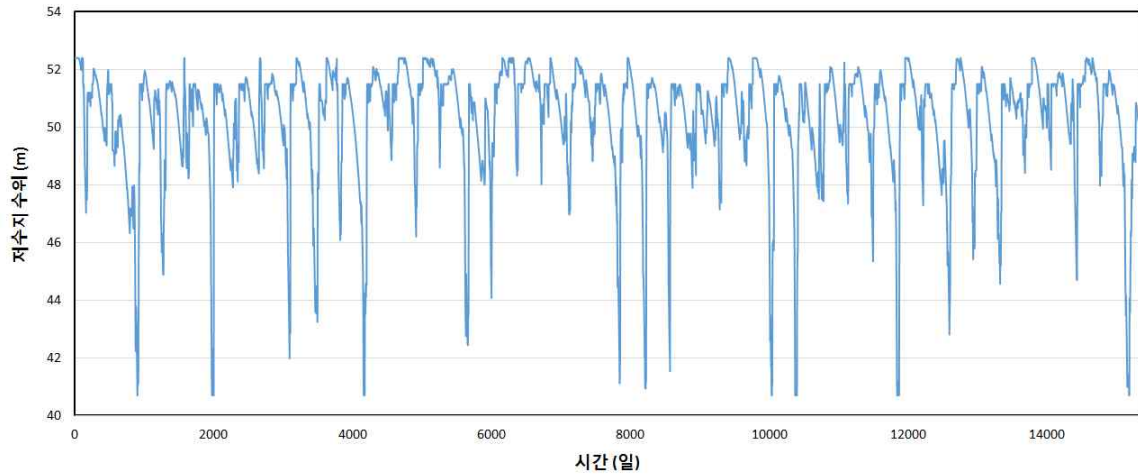
가. 대상지구

본 연구에서는 기존 농업용 저수지 환경용수 공급량 추정 지원 기술 적용 대상지구로 고삼저수지 지구로 선정하였다. 대상저수지는 [제 3 장 제 2 절]에서 보정 및 검정이 이루어졌으며, 상기 매개변수를 적용하였다. 관개효율은 연별로 보정된 2011~2014년의 평균인 80%를 이용하였다.

나. 모의 결과

환경용수 방류에 따른 고삼저수지의 수위 및 용량을 모의하였다. (그림 3-5-3)은 10월 1일 - 4월 1일까지 환경용수 50,000 m³/일을 방류하였을 경우 1973~2014년 동안의 저수지 수위 변화를 보여주고 있다. 연구 결과 저수지 수위는 42년 중 8년이 사수

위에 도달하는 것으로 나타났다. 이에 환경용수 방류량을 줄여서 재모의가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구결과는 설계시 관개면적을 적용한 경우로서 토지이용 변화 등 최근의 관개면적을 적용하면 결과는 달라질 것으로 사료되며 이에 대한 고려가 필요할 것이다.



(그림 3-5-3) 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 변화

4. 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술

논은 지역이나 토양, 기후 특성, 오염원 종류, 관개 및 시비 등의 경작방법에 따라 비점오염의 배출 양상이 다양하며 부영양화의 주원인으로 보고되고 있다 (송정현 등, 2012; Chung et al., 2003). 논 비점오염 관리를 위해서는 발생원 관리가 가장 효과적으로 알려져 있으며, 특히, 시비 효율 향상, 효율적인 물관리 등 다양한 영농방법 개선을 통한 비점오염원 발생 저감 방안 개발이 요구 되고 있다 (강문성, 2010; 송정현 등, 2012). 지난 수십년간 CREAMS-PADDY 모형 및 PADDIMOD 모형 등 국내외에서 많은 논 비점오염 모형이 개발되어 왔다 (서춘석 등, 2002; 전지홍 등, 2004). 하지만 이들 모형은 포장단위 모형으로 유역단위에서의 오염부하량 저감효과를 평가하기에는 한계가 있다. Kang et al. (2006)은 SWAT 모형에 논 물수지식을 추가하여 수계의 오염부하량을 모의하는 오염총량모의시스템을 개발하였으나, 상기 모형은 논에서의 수질 기작이 반영되지 않아 시비량 시나리오 등의 적용에 한계가 있다.

본 연구에서는 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술을 CREAMS-PADDY 모형과 LOADEST 기반 미계측 유역 오염부하량 추정 모형을 연계하여 COMFARM 기반으로 개발하고 그 적용성을 평가하고자 한다.

4.1 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술 개발

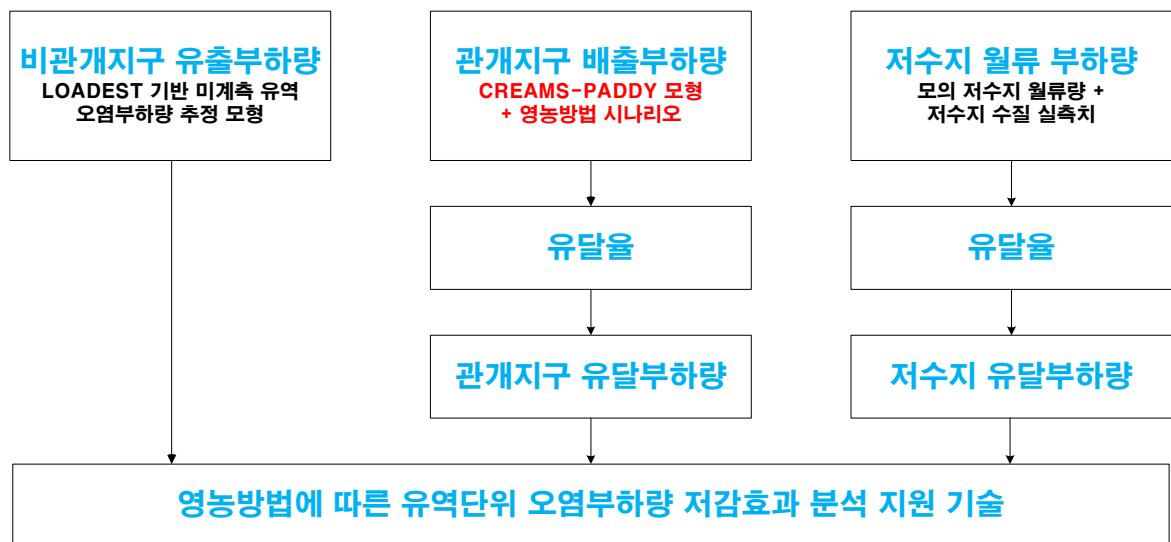
본 연구에서는 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술을 CREAMS-PADDY 모형과 LOADEST 기반 유출부하량 추정 모형을 연계하여 (그림 3-5-4)와 같이 개발하였다.

논에서의 영농방법 시나리오에 따른 배출부하량은 CREAMS-PADDY 모형을 이용

하여 모의한다. CREAMS-PADDY 모형은 담수 논에서의 물수지 및 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식에 기반하여 개발된 모형으로, 포장 배수량, 유사량, 총질소(T-N) 및 총인(T-P)의 농도, 그리고 T-N 및 T-P 배출부하량을 구하도록 구성되어 있다. 포장배수량은 강우량, 관개량, 침투량, 물꼬 높이를 입력받아 증발산량 공식과 물수지식에 의하여 추정되고, 유사량은 수정된 USLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 공식 (Wischmeier and Smith, 1978)으로 산정한다. 논물의 농도는 시비량, 강우의 농도, 관개수의 농도, 토양의 초기 영양물질량, 시비시기, 시비효율 등을 입력받아 영양물질의 이동을 이류-확산 반응식 기반 물질수지 식으로부터 추정하도록 구성되어 있다. CREAMS-PADDY 모형을 통해 모의된 영농방법별 배출부하량은 유달율을 곱하여 유역출구에서의 유달부하량을 산정한다. CREAMS-PADDY 모형에 대한 자세한 내용은 [제 3 장 제 3 절]에 상세히 서술되어 있다.

비관개지구의 유출부하량은 LOADEST 기반 미계측 유역 유출부하량 추정기법을 통해 모의되며, 이에 대한 개발 과정 및 적용성 평가 부분은 [제 3 장 제 1 절]에 상세히 서술되어 있다.

만약 저수지 하유유역의 유출부하량을 추정해야하는 경우 저수지의 물넘이 방류량에 따른 유달부하량 또한 고려될 필요가 있다. 이 경우 저수지 물넘이 방류량은 [제 3 장 제 2 절]의 기작을 이용하고, 수질은 실측치를 이용한다.



(그림 3-5-4) 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석 지원 기술

4.2 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술 적용

가. 대상지구

본 연구 대상지로 이동저수지 하류 유역을 선정하였으며, 유역 특성은 <표 3-5-2>와 같다.

CREAMS-PADDY 모형은 해당 관개지구에 대해 보정 및 검정이 완료된 바 있으며,

자세한 내용은 [제 3 장 제 3 절]에 상세히 서술되어 있다. 저수지 물수지 모형 또한 보정 및 검정이 이루어진 바 있으며, 이 또한 [제 3 장 제 3 절]에 상세히 서술되어 있다. 하류 비관개지구의 유출부하량은 LOADEST 기반 미세측 유역 오염부하량 추정 모형을 이용하여 모의하였다.

<표 3-5-2> 대상지구 유역특성 및 토지이용현황

유역	면적 (km ²)	유로연장 (km)	논 (%)	밭 (%)	산림 (%)	불투수율 (%)
이동저수지 하류유역	99.252	18.753	30.2	4.2	49.5	3.5

나. 모의 결과

<표 3-5-3>은 CREAMS-PADDY 모형과 LOADEST 기반 오염부하량 추정모형을 연계하여 2011-2012년에 대해 유역단위 오염부하량을 모의한 결과를 보여주고 있다. 유역단위 T-N 및 T-P 오염부하량은 관개지구에서 각각 20%와 52% 배출되는 것으로 나타났다.

CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 물꼬 높이를 70 mm에서 120 mm로 상승시켰을 경우 관개지구 배출부하량은 T-N 및 T-P 각각 20% 및 15% 저감되는 것으로 나타났다. 이를 통해 유역단위 오염부하량 저감효과는 각각 4% 및 8% 저감되는 것으로 나타났다 <표 3-5-4>.

<표 3-5-3> 유역단위 오염부하량 모의결과

2011-2012	비관개지구 배출	관개지구 배출	저수지 배출 (상류유역)	합계
T-N (kg)	1,174,476 (64%)	133,931 (7%)	520,873 (28%)	1,829,279
T-P (kg)	36,402 (36%)	53,313 (52%)	12,020 (12%)	101,735

<표 3-5-4> 물관리에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과

2011-2012	물꼬 높이 (70 mm)	물꼬 높이 (120 mm)
T-N (kg)	2,129,279 (100%)	2,042,493 (96%)
T-P (kg)	101,735 (100%)	93,738 (92%)

5. 요약 및 결론

본 절에서는 농촌용수 관리 의사결정지원 기술로써 ① 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술, ② 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위

관리 기술, 그리고 ③ 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석 지원 기술 등을 개발하였다. 본 절의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 기후변화에 따른 미래 농업용수 수요량 변화가 농업용 저수지의 물수지에 미치는 영향을 해석/분석하는 의사결정지원 기술을 COMFARM 기반으로 개발하고 고삼저수지 유역을 대상으로 그 적용성을 평가하였다.
- ② 본 연구에서는 농업용 저수지의 비관개기 환경용수 공급 확보 방안을 마련하기 위한 의사결정지원기술을 개발하였으며, 고삼저수지 유역을 대상으로 그 적용성을 평가하였다.
- ③ 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 오염부하량 저감효과 분석지원 기술을 CREAMS-PADDY 모형과 LOADEST 기반 미계측 유역 오염부하량 추정 모형을 연계하여 COMFARM 기반으로 개발하였으며, 이동저수지 유역을 대상으로 그 적용성을 평가하였다.

본 연구 개발 의사결정지원기술은 합리적 농촌용수 관리를 위해 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

제 6 절 객체 지향의 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발

1. 서론

유역 수리·수문·수질 통합시스템은 사용자 지원시스템을 기반으로 하는 GUI를 제공하며, 환경적인 정보 검색의 용이성, 다양한 분석도구 제공, 다양한 유역모형과 수질모형의 시스템 내에서 실행 등이 가능함으로서, 다양한 정보를 효율적으로 손쉽게 획득할 수 있으며, 정책관리자나 사용자가 의사결정을 하는데 도움을 주도록 발전하고 있다.

농촌 유역의 물순환 해석을 위해서는 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회경제적인 요소 등의 다양한 측면을 포괄하여야 할 것이다. 또한 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 것을 객체지향 모델링 기법이라 할 수 있다.

기 개발된 국내외 모형은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 해석하는데 한계가 있으며, 컴퓨터 기술 발전에 따른 계산능력이 크게 향상되었음에도 불구하고 농촌용수 해석이 직면하는 문제의 복잡성은 광범위한 요소가 포함되어 있어 가중되고 있으며, 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 따라서 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 지역 특징을 반영할 수 있는 능동적 모형 개발이 시급히 요구된다.

농촌용수의 복잡성을 고려하면 Framework는 다양한 모델 또는 모듈을 통합할 수 있고, 기존의 모델을 수정 하지 않고 모델간 연동이 이루어져야 하며, 따라서 확장성이 뛰어난 객체지향 기반의 Framework를 구성하여야 할 것이다.

농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 독립적인 객체로 모듈화하여 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모델 형태의 시스템 구축이 필요하나, 그에 대한 연구나 노력은 미흡한 실정이다.

우리나라 농촌용수구역 해석을 위해 기 개발되어 적용되고 있는 HOMWRS 모형은 농촌유역의 저수지 운영을 위하여 단순한 모형을 적용함으로써 사용이 편리한 반면, 유역 및 호소에서의 수질에 대한 고려가 없고 집중형 모형으로 공간적 분포 특성 고려에 미흡한 측면이 있다. 또한, 일별·순별 기반의 이수 측면만을 모의할 수 있으며, 홍수기 제한수위가 고려되지 않는 한계가 있다.

따라서, 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 복잡성 및 지역 특성을 반영하여 물순환을 모의하는 모형의 개발 필요하다. 또한, 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 객체지향 모델링 기법 기반의 맞춤형 모델 Framework 및 플랫폼 개발이 필요하다.

본 장에서는 객체지향의 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 개발을 위하여, ① 개발환경을 설명, ② 객체지향 모델링 기반 요소기술의 기본개념 및 모듈, ③ 모듈 기반의 플랫폼 개발 등을 정리하고자 한다.

2. 개발환경

2.1. 개발언어

자바는 자바언어로 기술된 프로그램 개발 및 실행을 할 수 있는 소프트웨어 모임의 총칭이다. 자바 프로그램은 운영체제나 하드웨어에 의존하지 않는 바이트 코드 (중간 언어)인 추상적인 코드로 구현된다.

따라서 자바 프로그램을 실행하기 위해서는 자바 가상 머신(JVM)과 개발에 필요한 표준 라이브러리 세트 및 컴파일러의 환경을 맞추어야 한다. 이를 맞추면 자바 프로그램은 모든 환경에서 동일하게 동작되며, 이러한 실행환경과 개발환경을 제공하는 것이 자바 플랫폼이다.

자바 플랫폼은 자바 언어(Java Language), 자바 애플리케이션(Java Application), 자바 애플릿(Java Applet), JRE(Java Runtime Environment), 자바 가상 머신(Java Virtual Machine), 모바일용 자바(Java ME), 자바 웹 스타트(Java Web Start) 등과 함께 단순히 「자바」(Java)라 불리는 경우가 많다. (그림 3-6-1)은 자바의 구성요소를 보여주고 있다.



(그림 3-6-1) 자바(Java) 구성 요소 (출처 : Oracle 홈페이지)

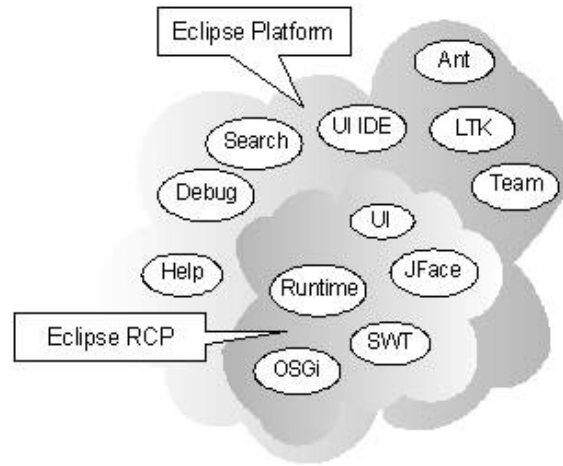
2.2. 개발툴

개발툴은 이클립스 (Eclipse) 통합개발환경 (IDE, Integrated Development Environment)을 이용하였다. 이클립스 IDE는 프로그램 개발을 위한 환경을 하나의 소프트웨어에서 제공한다.

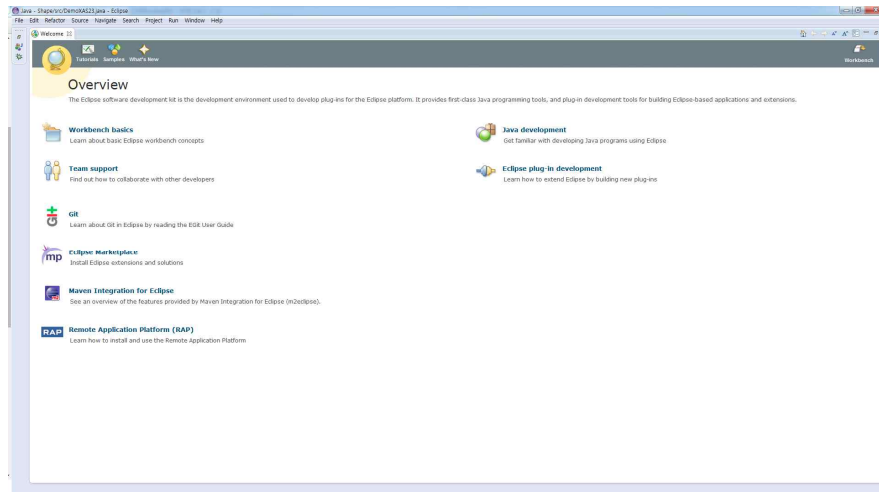
이클립스 IDE 내부에는 Java, C, Python등의 다양한 개발언어와 웹 기술, 데이터 가공, Reporting에 이르는 다양한 시스템을 지원하는 범용 도구 플랫폼 (Generic Tooling Platform)이 있다. 도구 플랫폼 밑에는 애플리케이션 (Application) 실행을 위한 범용 플랫폼인 이클립스 RCP (Eclipse Rich Client

Platform)가 있다. 이클립스 IDE는 이 범용 플랫폼 기반 애플리케이션 중 하나이다.

(그림 3-6-2)는 이클립스 플랫폼의 구성을 보여주고 있으며 (그림 3-6-3)은 이클립스 IDE의 실행화면을 나타내고 있다.



(그림 3-6-2) 이클립스 플랫폼의 구성 (출처: 이클립스 홈페이지)



(그림 3-6-3) 이클립스 IDE 실행화면

3. 객체지향 모델링 기반 요소기술 개발

3.1. 기본 개념

객체지향 모델링은 레고플레이트에 다양한 레고블럭들을 단순 조립하여 다양한 작품을 제작하듯이 기본적인 플랫폼 위에 다양하게 제작된 입출력모듈, 계산모듈들을 손쉽게 연결하여 전체적인 데이터의 흐름과 계산단계별 제어 및 개별 모듈을 언제든지 바꾸거나 추가하여 전체 시스템을 어느 현장에든 쉽게 적용하도록 하는 모델링 기법이다.

(그림 3-6-4)는 레고 플레이트와 레고블럭들을 이용해 제품을 제작하는 과정을 보여주고 있으며 이를 통해 객체지향 모델링의 개념을 이해할 수 있다.

3.3. 모듈 아바타

본 연구에서 개발된 개별 모듈 아바타 (avatar)에 대한 설명은 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-8)과 같다.



(그림 3-6-8) 모듈아바타

- ① 모듈ID이며 모듈을 구분하는 모듈 고유ID로 영문자 3자를 부여한다.
- ② 모듈 타이틀이며 실행모듈의 기능을 대표 할 수 있는 모듈 이름으로 한글 7자·영문14자 이내로 한다.
- ③ 입력데이터 개수만큼의 연결 point를 나타낸다.
 - 현재 지정된 workspace에 데이터가 있을 때는 청색으로 표시한다.
 - 현재 지정된 workspace에 데이터가 없을 때는 적색으로 표시한다.
- ④ 모듈에서 생성되는 출력파일의 연결 point 나타낸다.
 - 현재 지정된 workspace에 데이터가 있을 때는 청색으로 표시한다.
 - 현재 지정된 workspace에 데이터가 없을 때는 적색으로 표시한다.

3.4. 객체 모듈 구조

본 연구에서 개발된 객체 모듈 구조는 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-9)와 같다.



(그림 3-6-9) 모듈 정보 표시화면

1	ModuleID	TRA0
2	RunTitle	유역유출량 분석
3	Module	KT_L_lgc2.jar
4	color	0,139,0
5	Size	150,110
6	input	_i_TBAS.sam,_i_T
7	output	_o_if4.sam,_o_tif.s
8	author	

Modify

- ① 모듈의 고유 ID : TRA0
- ② 모듈 이름 : TankModel분석
- ③ 모듈 실행 파일 : KT_L_lgc2.jar
- ④ 모듈 색상 : 0, 139, 0(RGB)
- ⑤ 모듈 크기 : 150, 110(가로, 세로)
- ⑥ 입력파일
 - p2200_i_TBAS.sam(workspace에 있음)
 - p2200_i_TPAR.sam(workspace에 있음)
 - p2200_i_met245.sam(workspace에 없음)
- ⑦ 출력파일
 - p2200_o_if4.sam(workspace에 없음)
 - p2200_o_tif.sam(workspace에 없음)
- ⑧ 저자이름

3.5. 모듈 유형

모듈의 유형으로는 (그림 3-6-10)과 같이 계산모듈, 입력자료 생성 모듈, 데이터 출력모듈이 있다. 계산 모듈은 입력 자료들을 받아서 계산하고 출력파일들을 생성하고 계산하는 모듈을 말하며 입력 데이터와 출력 데이터가 존재한다.

입력자료 생성 모듈의 경우는 입력 자료는 없으며 출력파일만 존재하는 모듈을 의미한다. 데이터 출력 모듈은 계산 모듈에서 생성된 출력파일을 받아들여 출력물을 보여주거나 데이터를 표, 그래프 등의 방법으로 출력하는 모듈을 나

타낸다.



(a) 계산모듈 예

(c) 출력 데이터 표출모듈 예

(b) 입력자료 생성 모듈 예

(그림 3-6-10) 모듈의 유형 예시

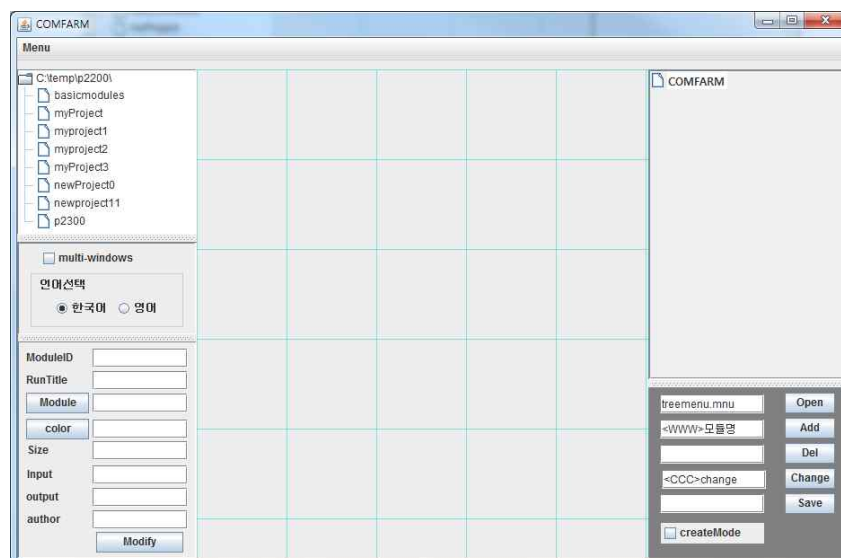
4. 모듈 기반의 플랫폼 개발

세부 모듈들을 자유롭게 불러내고 활용이 가능한 모듈 기반의 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼 위에 각종 모듈들을 활용하여 연구대상 유역을 구현할 수 있으며, 각 모듈의 기능을 활용해 유역의 물순환을 해석할 수 있다. 플랫폼에 대한 설명과 사용방법은 다음과 같다.

4.1. 플랫폼 개요

가. 실행 초기화면

프로그램을 처음 실행하면 (그림 3-6-11)과 같이 아무것도 추가되지 않은 빈 플랫폼이 나타난다. 빈 플랫폼에 각종 모듈을 추가 및 수정하여 해석하고자 하는 유역을 구성할 수 있다. 다음 실행할 때에는 최근 구성한 단위 프로젝트가 열린다.



(그림 3-6-11) Blank 플랫폼 화면

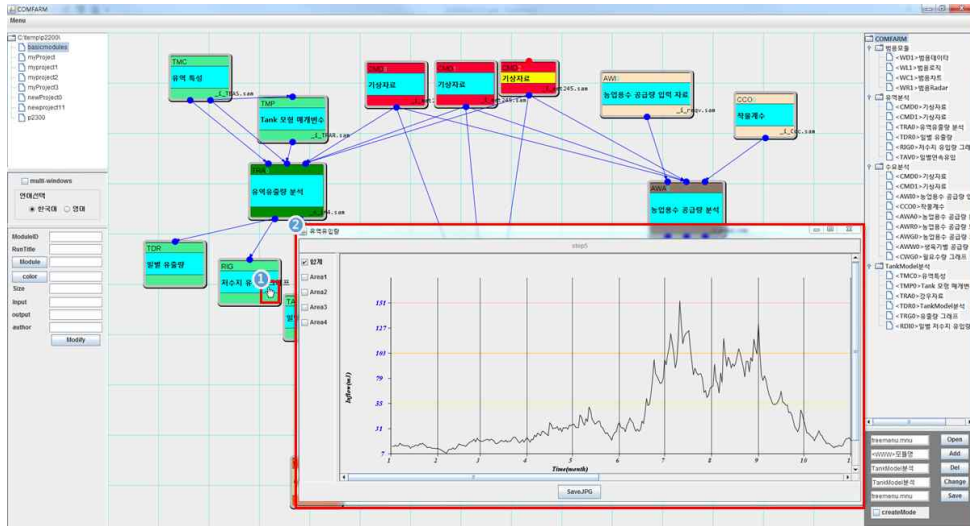
다. 플랫폼을 이용한 실행 화면

플랫폼을 이용하여 모듈들을 실행한 화면은 (그림 3-6-13), (그림 3-6-14)와 같다.

실행 화면1

저수지 유입량을 그래프로 보여주는 모듈을 실행

- ① 저수지 유입량 그래프 모듈을 실행영역에서 클릭한다.
- ② 저수지 유입량 그래프 모듈이 실행된다.

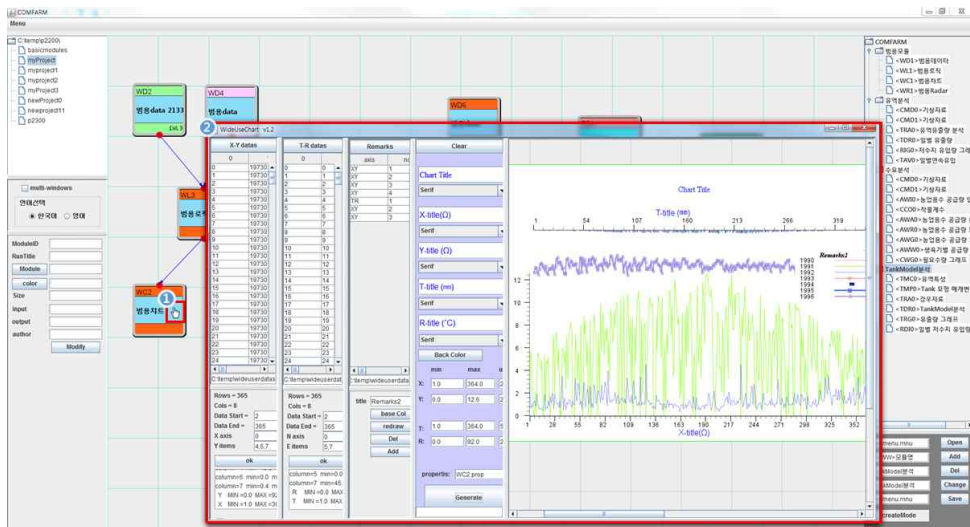


(그림 3-6-13) 저수지 유입량 모듈 실행

실행 화면2

범용데이터를 그래프로 보여주는 모듈을 실행

- ① 범용차트 모듈을 실행영역에서 클릭한다.
- ② 범용차트 모듈이 실행된다.



(그림 3-6-14) 범용차트 모듈 실행

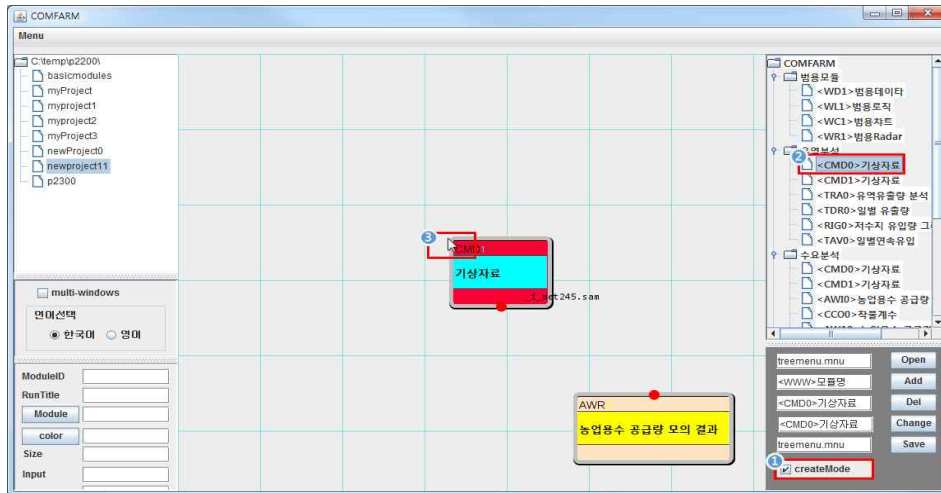
4.2. 새로운 프로젝트 구성

준비된 개별 모듈들을 조합하여 새로운 농촌용수 물순환을 해석할 수 있는 프로젝트를 생성하는 작업이다.

가. 모듈의 생성

workbench에 신규 모듈을 생성할 수 있다. 모듈생성은 기존 등록된 모듈과 사용자가 만든 모듈을 등록하여 생성할 수 있다. 그 과정과 기능은 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-15), (그림 3-6-16)과 같다.

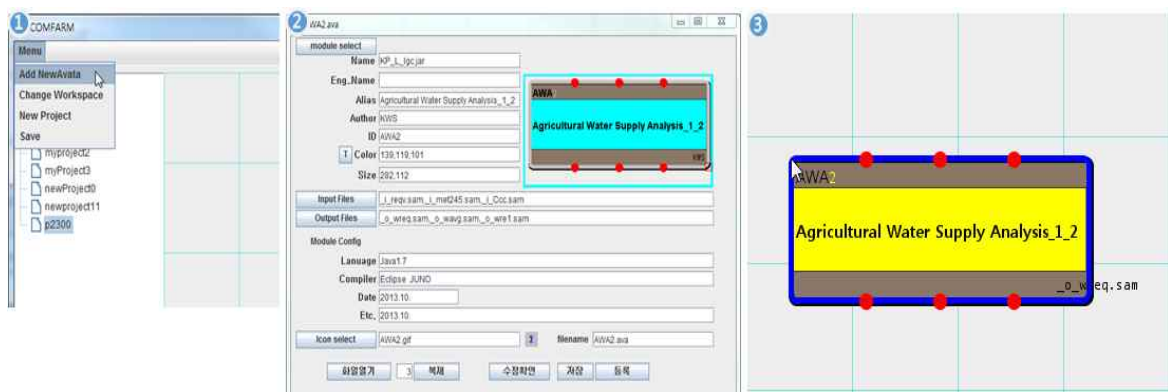
- 기존 등록된 모듈 생성



(그림 3-6-15) 기존 등록된 모듈 생성

- ① 플랫폼 오른쪽 아래의 createMode 체크박스에 클릭하여 체크상태로 만든다.
- ② 플랫폼 오른쪽 메뉴트리에서 생성하려는 모듈을 클릭한다.
- ③ workbench 안에 클릭하면 클릭한 위치에 모듈이 생성된다.

- 사용자가 개발한 신규 모듈 생성



(그림 3-6-16) 사용자가 개발한 신규 모듈 생성

- ① 플랫폼 왼쪽 메뉴바에서 [Menu]-[Add NewAvata]를 클릭한다.
- ② 아바타 등록창이 열리고 아바타정보를 입력하고 등록 버튼을 클릭한다.
- ③ workbench 안에 클릭하면 클릭한 위치에 모듈이 생성된다.

나. 모듈의 배치/편집

workbench에 있는 모듈의 위치를 변경하거나 모듈을 제거하고, 모듈들의 데이터 연관관계를 화면에 보여준다. 절차는 다음과 같으며 화면구성은 (그림 3-6-17)과 같다.



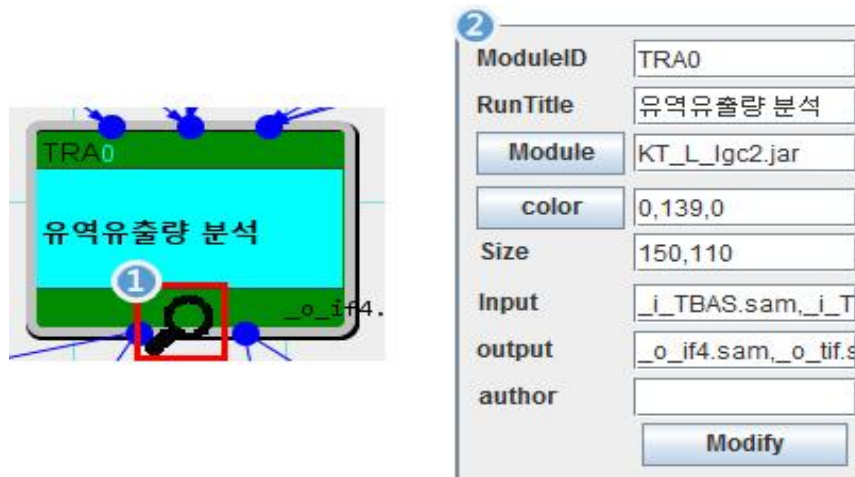
(그림 3-6-17) 개별모듈 이동 및 제거

- ① 개별모듈의 상단부에서 마우스 커서 모양이 ①과 같이 바뀌고 Drag&Drop을 하면 모듈의 위치가 변경된다.
- ② 개별모듈의 상단부에서 마우스 커서 모양이 ①과 같이 바뀌고 Workbench 밖으로 Drag&Drop을 하면 모듈이 제거된다.

다. 모듈 정보 확인

Module Info는 모듈의 정보를 보여주는 역할을 한다. 실행과정은 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-18)과 같다.

- ① 개별 모듈의 중앙부분에 마우스를 올리면 마우스 커서모양이 ①과 같이 바뀌고 클릭한다.
- ② 플랫폼 왼쪽 모듈정보 표출부분에 해당 모듈 정보가 표출된다.

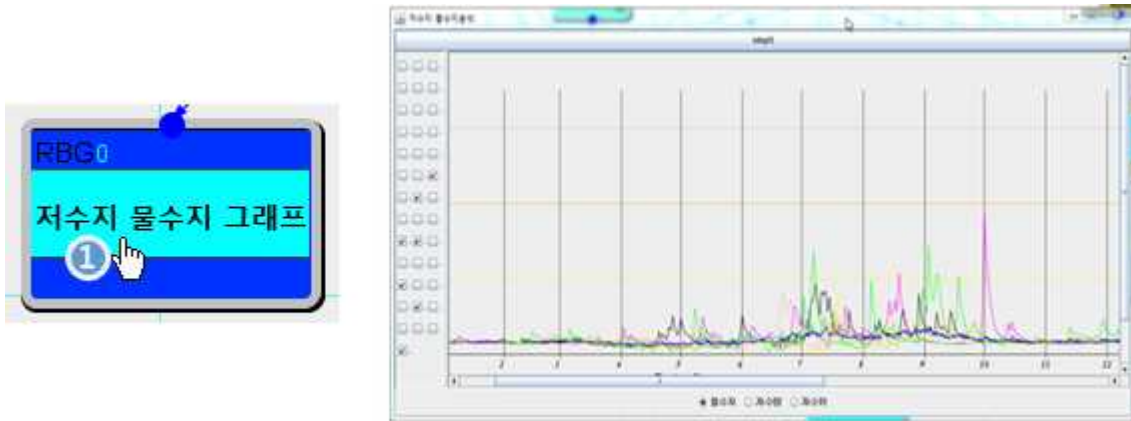


(그림 3-6-18) 개별모듈 정보

라. 모듈의 실행 확인

EXExecute mode를 이용하면 workbench에 있는 모듈을 실행 할 수 있다. 실행과정은 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-19)와 같다.

- ① 개별 모듈의 중앙부분에 마우스를 올리면 마우스 커서모양이 ①과 같이 바뀌고 클릭을 하면 개별모듈이 실행된다.

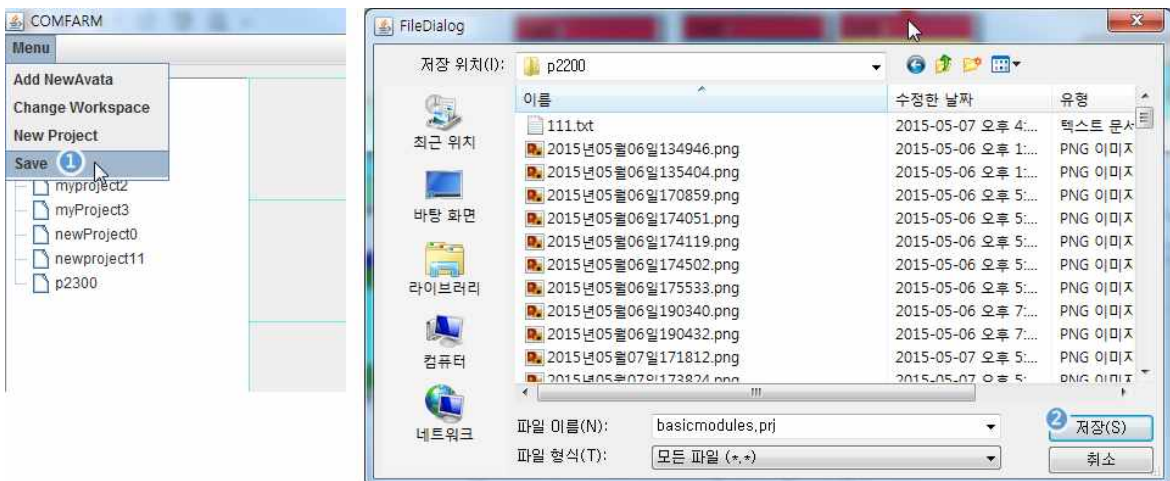


(그림 3-6-19) 개별모듈 실행

마. 프로젝트의 저장

Save를 이용하여 작업한 내용을 저장할 수 있다. 실행과정은 다음과 같으며 구성화면은 (그림 3-6-20)과 같다.

- ① 플랫폼 왼쪽 메뉴바에서 [Menu]-[Save]를 클릭한다.
- ② 기존의 파일선택하거나 파일이름에 입력하고 [저장] 버튼을 클릭하면 작업한 내용을 저장 할 수 있다.



(그림 3-6-20) 저장화면

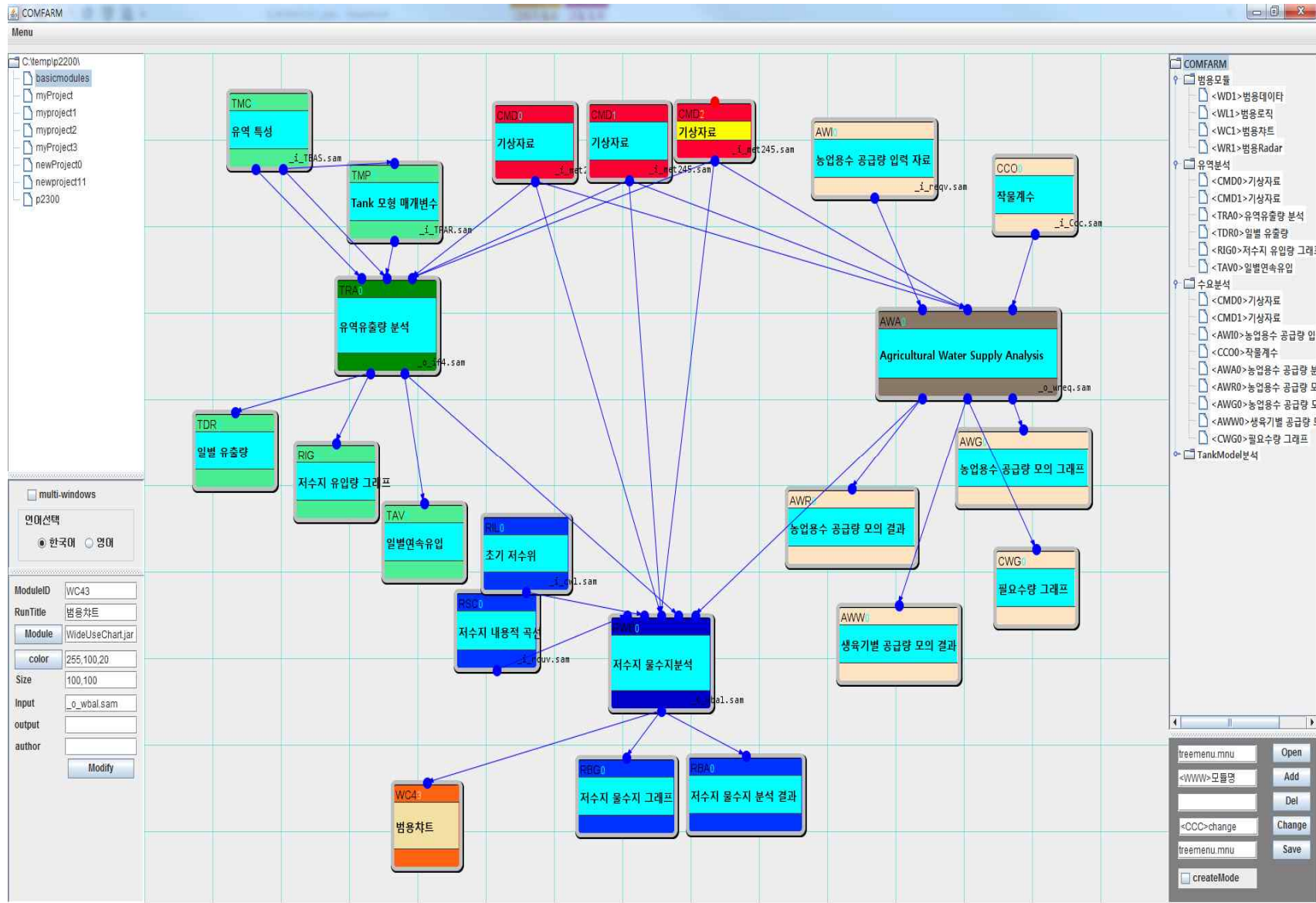
5. 모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석

5.1. 개발된 모듈

<표 3-6-1>은 본 연구에서 개발한 기본 모듈들을 보여주고 있다. 모듈은 기능에 따라 크게 저수지 유입량 모듈, 농업용수 공급량 모듈, 저수지 물수지 분석모듈로 구분되며 총 21개로 이루어졌다. (그림 3-6-21)은 플랫폼에서의 기본 모듈을 보여주고 있다.

<표 3-6-1> 개발 모듈 목록

번호	기능 구분	모듈 ID	모듈명	개발모듈명	기능설명
1	저수지 유입량 모듈	TMC	유역특성	KT_d_bas.jar	분할된 유역의 면적 진, 담, 임야 비율 입력
2		TMP	Tank 모형 매개변수	KT_d_par.jar	분할된 유역의 면적 진, 담, 임야 비율 입력으로 계산된 탱크모형 파라미터 설정
3		CMD	기상자료	KT_d_met2.jar	강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속 데이터를 작성
4		CMD1	기상자료	KT_d_met4.jar	강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속 데이터를 그리드형태로 작성
5		CMD2	기상자료	KT_d_met6.jar	강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속 엑셀 데이터를 작성
6		TRA	유역유출량분석	KT_L_lgc2.jar	TANK모형으로 유역유입량을 분석
7		TDR	일별 유출량	KT_p_inf4.jar	TANK모형으로 분석 계산된 연간, 일별 유입량을 표출
8		TAV	일별연속유입	KT_p_tif.jar	TANK모형으로 분석 계산된 전 기간 일별연속유입유입량을 보여줌
9		RIG	저수지유입량 그래프	KT_p_infg.jar	유역유입량을 그래프로 표출
10	농업용수 공급량 모듈	AWI	농업용수 공급량 입력 자료	KP_d_cfg.jar	P-M식에 사용되는 강우, 증발, 기온, 습도, 일조, 풍속 데이터를 작성
11		AWA	농업용수 공급량 분석	KP_L_lgc.jar	P-M식으로 수요분석계산을 계산
12		CCO	작물계수	KP_d_Ccc.jar	P-M식에 필요한 작물계수를 입력
13		AWW	생육기별 공급량 모의 결과	KP_p_wavg.jar	Penman식 계산결과로 출력된 일별수요수량을 보여줌
14		AWR	농업용수 공급량 모의 결과	KP_p_wreq.jar	P-M식 계산결과로 출력된 생육기 수요량을 보여줌
15		CWG	필요수량 그래프	KP_p_wav1.jar	Penman식 계산결과로 출력된 필요수량평균을 그래프로 보여줌
16		AWG	농업용수 공급량 모의 그래프	KP_p_wre1.jar	Penman식 계산결과로 출력된 일별수요수량을 그래프로 보여줌
17	저수지 유입량 모듈	RWB	저수지 물수지 분석	KB_L_lgc.jar	TANK모형으로 분석된 유역유입량과 P-M식 계산결과로 출력된 일별수요수량과 강우량으로 물수지 분석
18		RSC	저수지 내용적 곡선	KB_d_rcuv.jar	저수지내용적 CURVE를 보여줌
19		RIL	초기 저수위	KB_d_cw1.jar	초기저수위를 보여줌
20		RBG	저수지 물수지 그래프	KB_p_wbg1.jar	저수지물수지를 그래프로 보여줌
21		RBA	저수지 물수지 분석 결과	KB_p_wbal.jar	물수지 분석 결과를 보여줌



(그림 3-6-21) 전체 모듈의 조합을 통한 물수지 분석

5.2. 플랫폼 기능 추가 및 편리성 개선

가. 개선/검토 사항

농촌용수 물순환 종합해석 동적모의 플랫폼 Ver3.0에 대한 개선요구사항이 다음과 같이 도출 되었으며 개선요구사항 내용은 <표 3-6-2>와 같다.

<표 3-6-2> 개선요구사항

일련 번호	내용	유형	구분
1	새로운 플랫폼을 만드는 기능이 없음	4	F
2	한글, 영어 선택 가능하도록 변경	4	F
3	모듈의 이동 및 삭제를 MS Powerpoint와 같게 변경. 모듈 선택하는 아이콘 추가 및 키보드로 이동 가능 및 Delete 키로 삭제	4	F
4	상단의 아이콘을 Drag&Drop하면 바로 모듈이 추가되고 모듈 아이콘 우측상단에 버튼을 추가하여 편집, 삭제, 모듈정보를 나타내도록 구성하면 좋겠음	4	F
5	원하지 않는 혹은 잘못 만든 모듈(아이콘)이 툴바에 등록된 경우 등을 고려하여 삭제할 수 있는 기능이 있었으면 좋겠음.	4	F
6	모듈간 계층구조를 파악할 수 있는 트리뷰 화면의 구성필요. 단순히 모듈간의 data flow만 보서는 계층을 파악하기 어려움.	4	F
7	data flow를 움직여서 입력, 출력값을 설정할 수 있도록 하는 기능이 필요.	3	F
8	모듈 정보 화면을 팝업이 아니라 플랫폼 왼쪽 아래에 고정으로 출력	4	F
9	자료 입력 모듈에서 자료를 보여줄 때 그리드 기반으로만 보여주도록 변경	4	M
10	범용 입력 모듈 추가	1	M
11	범용 메인 모듈 추가	1	M
12	범용 출력 모듈 추가	1	M
13	자료 출력 모듈에서 그래프 그림 저장할 수 있도록 변경	4	M
14	저수지물수지 Curve 모듈에서 실행을 여러 번 누르면 왼쪽에 연도가 여러 번 나타남	2	M

*유형 1 : 공식/모듈 추가, 2 : 에러수정, 3 : 검토대상, 4 : 기능개선

*구분 F : Flatform개선, M : Module개선

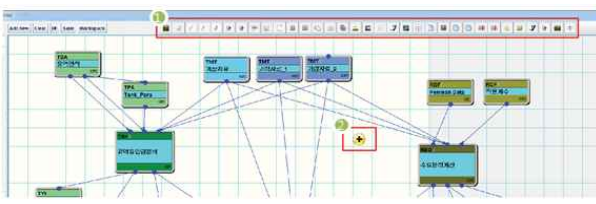
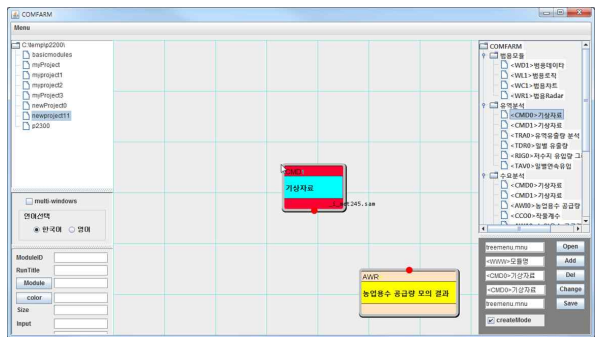

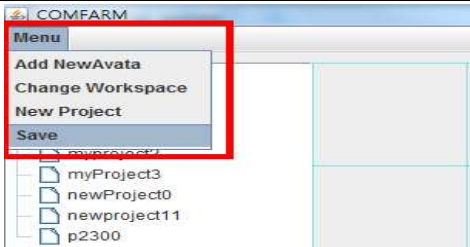
나. 개선사항

사용자 인터페이스를 고려, 개선요구사항을 수렴하여 농촌용수 물순환 동적 모의 플랫폼을 개선하였다. 사용자 인터페이스(User Interface, UI)는 사람(사용자)과 사물 또는 시스템, 특히 기계, 컴퓨터 프로그램 등 사이에서 상호작용을 구축할 수 있는 요소 및 환경을 말한다. 본 플랫폼은 사용자 인터페이스 설계 원칙에 따라 개선하였다.

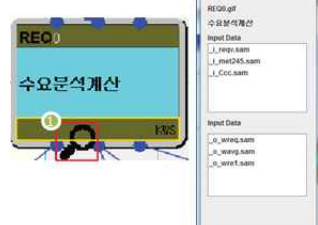
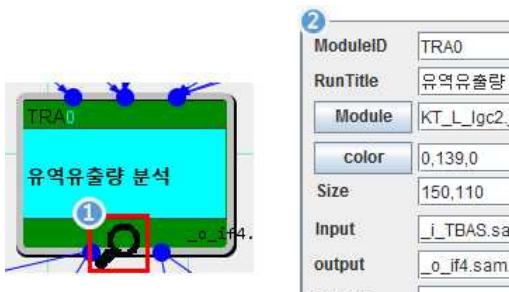
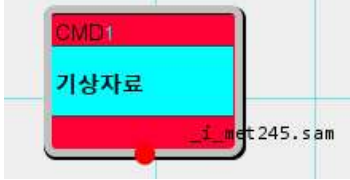

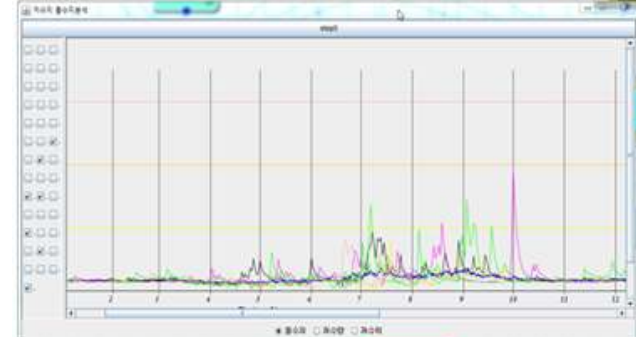
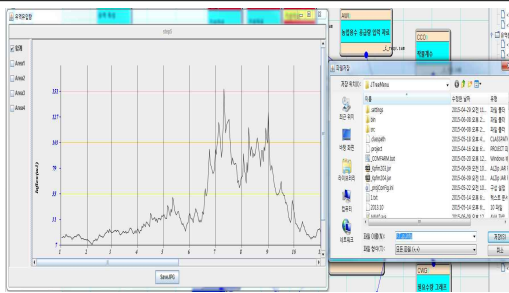
- ① 직관성(Intuitiveness) : 처음 사용할 시에도 사용방법이 직관적이고
- ② 일관성(Consistency) : 그것이 여러 부분에 걸쳐 일관적이라면 학습하기가 용이하다.
- ③ 효율성(Effectiveness) : 익숙해진 다음에 더 효율적으로 사용할 수 있다면 가장 좋다.

플랫폼 상세 개선내용은 <표 3-6-3>과 같다.

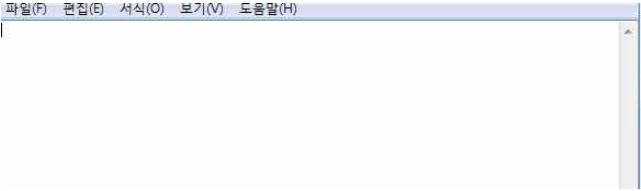

<표 3-6-3> 플랫폼 상세 개선 내용

기능	버전	화면	내용
개별 모듈 생성	ver 2.0		툴바에서 생성하려는 모듈을 선택하면 마우스의 커서모양이 바뀌며 생성하려는 위치에 클릭하는 방식
	ver 3.0		플랫폼 오른쪽에 메뉴 트리에서 등록된 모듈을 클릭하고 생성하려는 위치에 클릭하면 생성되는 방식. 기존 툴바 아이콘이 안보이고 어떤 모듈명이 안보이는 문제 개선.
기타 메뉴	ver 2.0		기타 메뉴 (저장, 새로운 아바타 등록, 워크스페이스 변경 등)를 버튼으로 두었음.
	ver 3.0		기타 메뉴 (저장, 새로운 아바타 등록, 워크스페이스 변경 등)를 메뉴바(MenuBar)로 구성하여 UI로 변경.

<표 3-6-3> 플랫폼 상세 개선 내용 (계속)

기능	버전	화면	내용
개별 모듈 정보	ver 2.0		모듈의 하단 부분에 마우스를 올리면 마우스의 커서모양이 바뀌고 모듈을 클릭하면 모듈정보를 표출하는 창이 열리는 방식
	ver 3.0		모듈의 하단 부분에 마우스를 올리면 마우스의 커서모양이 바뀌고 모듈을 클릭하면 모듈정보를 플랫폼 좌측 모듈정보 표출부분에 정보가 보여진다.
모듈명 한/영 변경	ver 2.0		모듈명이 아바타 파일에 저장되어있는 명으로 표출된다.
	ver 3.0		모듈명이 한글, 영어 선택에 따라서 표출된다.
그래프 출력 모듈 jpg 저장	ver 2.0		그래프를 jpg로 저장하는 기능이 없음.
	ver 3.0		출력된 그래프를 jpg 파일로 지정한 경로에 저장할 수 있다.

<표 3-6-3> 플랫폼 상세 개선 내용 (계속)

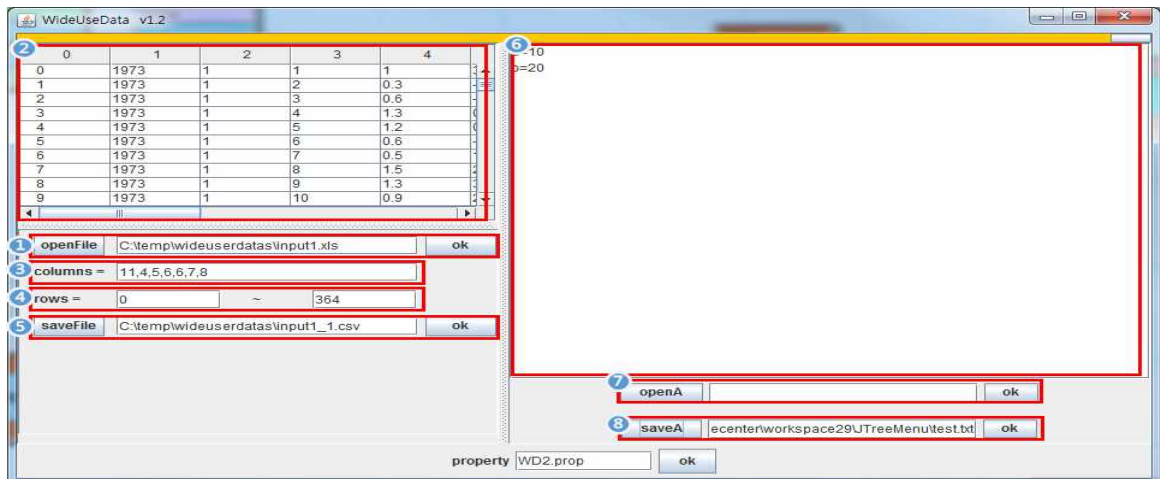
기능	버전	화면	내용
그리드 기반의 자료 출력 모듈	ver 2.0		자료출력 모듈이 텍스트 기반으로 되어 있음.
	ver 3.0		텍스트 기반으로 되어있는 자료출력 모듈을 모두 그리드 기반으로 변경 하여 가독성 향상.

5.3. 범용 모듈 추가 및 기능개선

범용 모듈들은 농촌용수 초기데이터, 프로젝트 전반에 적용되는 값 또는 농촌용수 분석요소 모듈에 적용되는 값을 사용자 관점에서 쉽게 데이터를 확인할 수 있는 정해져 있지 않은 모듈이다.

가. 범용입력모듈

범용입력모듈 사용하는 방법은 다음과 같으며, (그림 3-6-22)에 나타내었다.

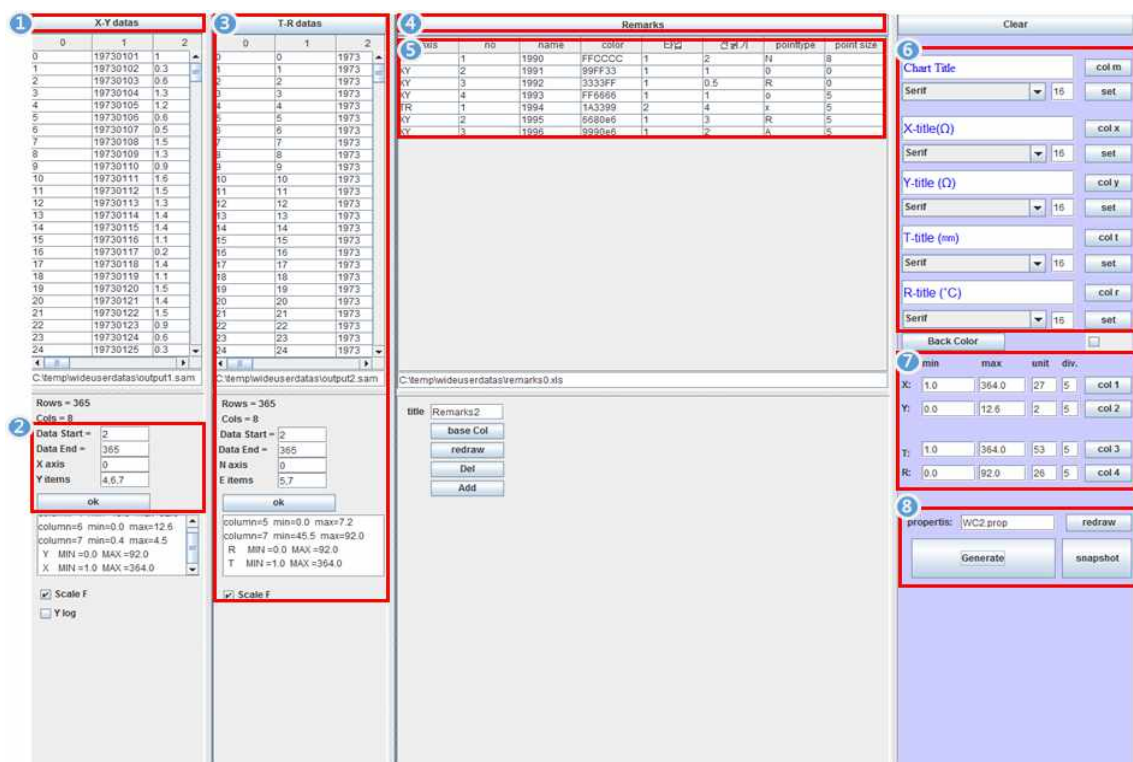


(그림 3-6-22) 범용입력모듈

- ① 분석모듈에서 사용할 농촌용수 초기데이터를 불러온다.
- ② 불러온 초기데이터
- ③ 초기데이터에서 필요한 데이터 컬럼을 지정해준다.
- ④ 초기데이터에서 필요한 데이터 로우를 지정해준다.
- ⑤ 편집한 데이터를 저장할 위치를 지정해주고, 저장한다.
- ⑥ 자유형식의 데이터를 입력할 수 있다.
- ⑦ 자유형식의 데이터를 불러올 수 있다.
- ⑧ 편집한 자유형식의 데이터를 저장할 위치를 지정해주고, 저장한다.

나. 범용출력모듈

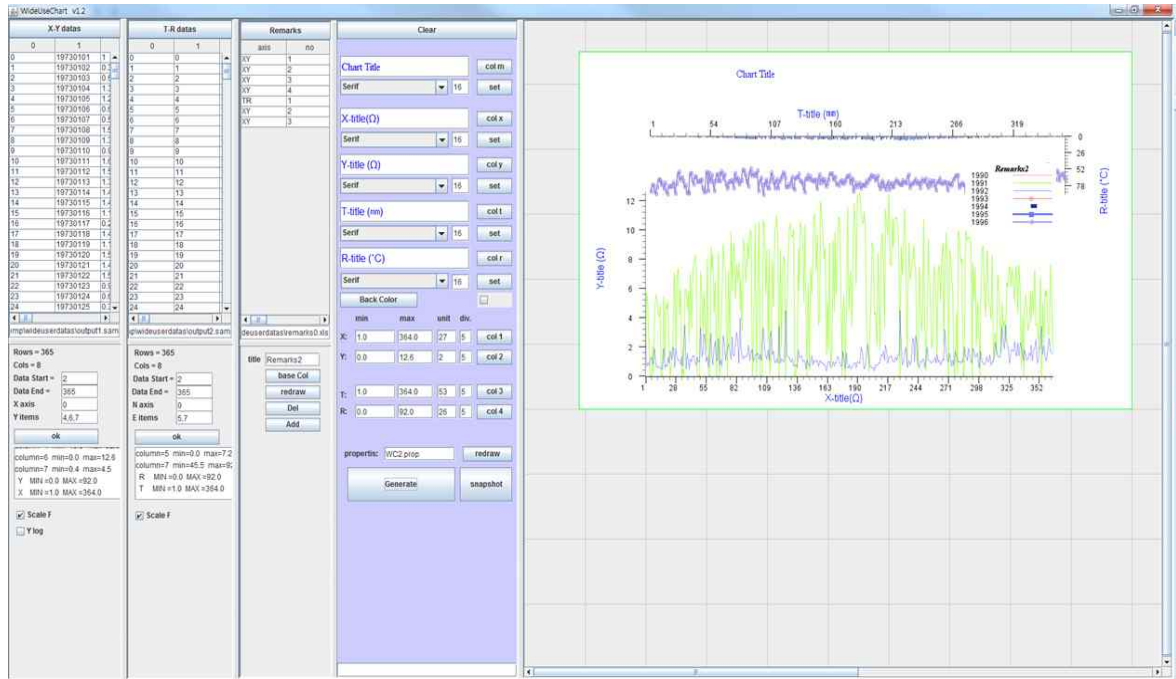
범용출력모듈 사용하는 방법은 다음과 같으며, (그림 3-6-23)에 나타내었다.



(그림 3-6-23) 범용 출력 모듈 (1)

- ① 그래프 x-y축에 출력할 분석모듈의 output파일을 X-Y datas 버튼을 클릭하여 불러온다.
- ② 그래프 x-y축에 출력할 데이터의 시작, 끝 로우와 데이터 컬럼을 지정해주고 ok 버튼을 클릭한다.
- ③ t-r축 설정 부분으로 ①, ②의 내용과 같다.
- ④ Remarks 버튼을 클릭하면 범례내용이 저장 된 파일을 불러온다.
- ⑤ 범례내용이 저장 된 파일로 해당 셀을 더블 클릭하여 내용을 바꿀 수 있다.
- ⑥ X-Y, T-R축의 타이틀의 내용, 색, 폰트, 폰트사이즈를 수정할 수 있다.

- ⑦ X-Y, T-R축의 최소값, 최대값, 간격, unit값을 수정할 수 있다.
- ⑧ Generate버튼을 클릭하면 설정 값을 기반으로 그래프가 출력되고 snapshot버튼을 클릭하면 루트 폴더에 그래프가 캡처 된 파일이 생성되고, 설정값들이 properties 파일에 저장이 된다.



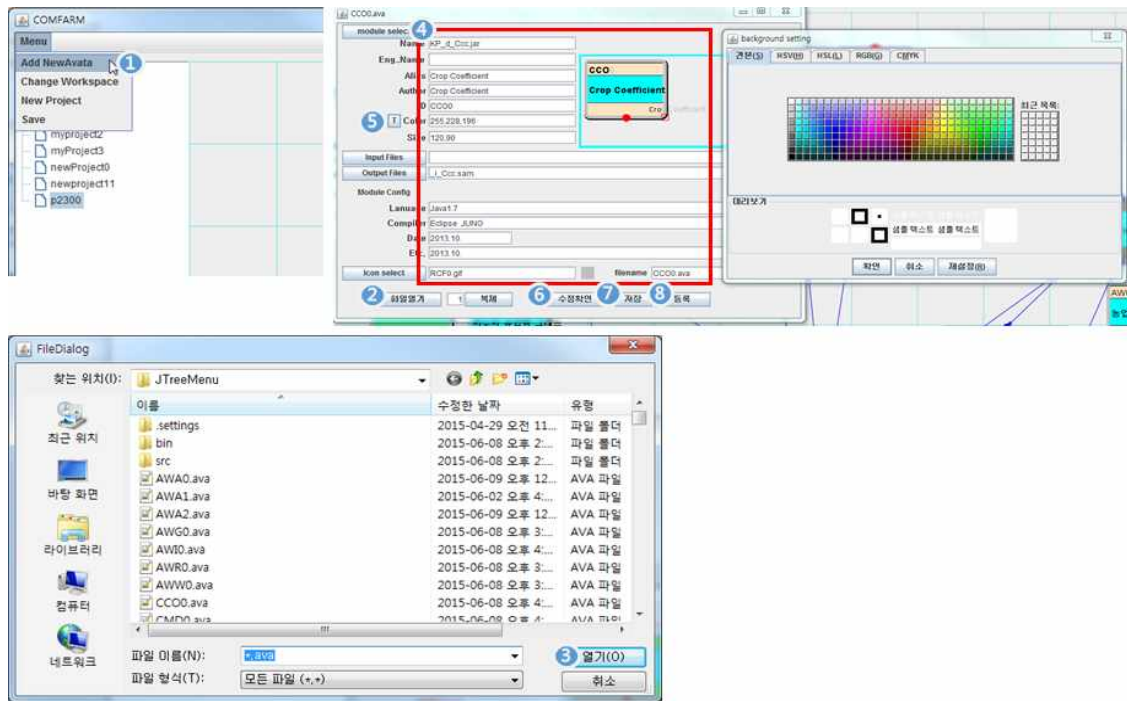
(그림 3-6-24) 범용 출력 모듈 (2)

5.4. 외부프로그램의 모듈화

가. 외부프로그램을 모듈화

농촌용수에 대한 다양한 요소에 능동적으로 대응하여, 농촌용수 분석요소 모듈을 간편하게 하기 위하여 새로운 모듈을 추가로 등록할 수 있다. 플랫폼에 새로운 모듈을 등록하는 과정은 다음과 같으며, (그림 3-6-25)에 나타내었다.

- ① 플랫폼 좌측 상단 [Menu]-[Add NewAvata]를 클릭한다.
- ② [화일열기] 버튼을 클릭하면 FileDialog창이 팝업 된다.
- ③ 팝업 된 FileDialog창에서 등록하려는 모듈을 선택하고 열기 버튼을 클릭한다.
- ④ Name, Alias, Author, Code, Color, size 등을 수정할 수 있다.
- ⑤ [T] 버튼을 클릭하면 Color를 선택할 수 있는 창이 열리고 Color를 선택할 수 있다.
- ⑥ [수정확인] 버튼을 클릭하면 적용 된 모듈을 확인할 수 있다.
- ⑦ [저장] 버튼을 클릭하여 새로운 모듈의 상태를 저장할 수 있다.
- ⑧ [등록] 버튼을 클릭하면 플랫폼 상단에 있는 툴바에 새로운 모듈이 추가된다.



(그림 3-6-25) 모듈 등록 예

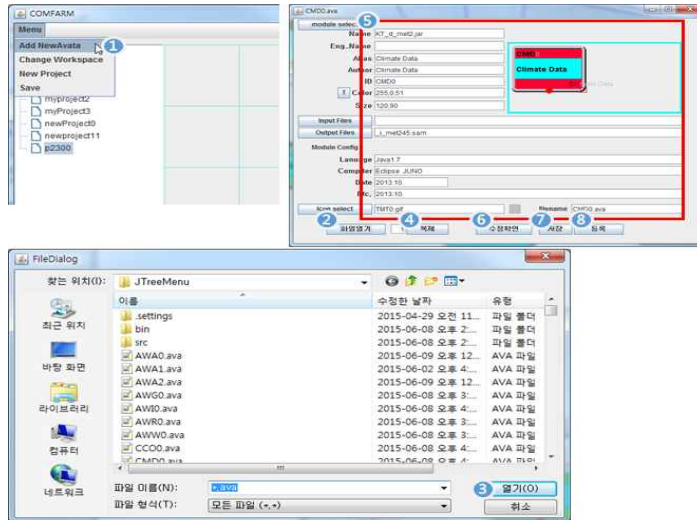
나. 모듈 복제

농촌용수 해석 모델링은 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회 경제적인 요소를 포괄하고 있다. 또한 시간 및 지역적으로 그 특성에 따라 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 모형도 능동적으로 구축될 필요가 있다.

따라서, 다양하고 복잡한 환경의 농촌용수 해석을 위해서는 분석 요소들을 각각 하나의 해석 단위로 개발하고, 각 요소들을 조합하여 환경에 따른 맞춤형 해석을 수행할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하다.

2차년도는 분석요소 모듈이 다양하게 조합할 수 있도록 모듈 복제 기능을 추가하였다. 기 작성된 분석요소 모듈을 환경, 특징에 따라 손쉽게 복제하여 사용이 가능하다. 모듈 복제 기능은 (그림 3-6-26)과 같다.

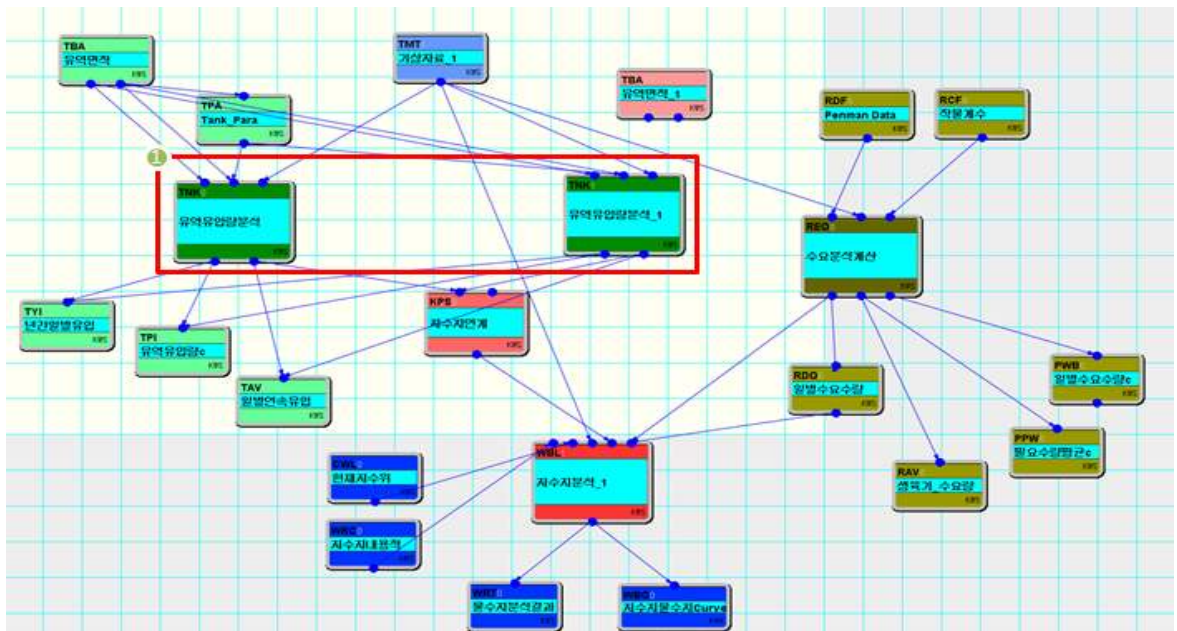
- ① 플랫폼 좌측 상단 [Menu]-[Add NewAvata]를 클릭한다.
- ② [화일열기] 버튼을 클릭하면 FileDialog창이 팝업 된다.
- ③ 팝업 된 FileDialog창에서 복제하려는 모듈을 선택하고 열기 버튼을 클릭한다.
- ④ [복제] 버튼을 클릭하면 모듈이름과 모듈아이콘의 이름에 복제번호가 붙는다.
- ⑤ Name, Alias, Author, Code, Color, size 등을 수정할 수 있다.
- ⑥ [수정확인] 버튼을 클릭하면 적용된 모듈을 확인할 수 있다.
- ⑦ [저장] 버튼을 클릭하여 복제한 모듈을 저장할 수 있다.
- ⑧ [등록] 버튼을 클릭하면 플랫폼 상단에 있는 툴바에 복제된 모듈이 추가된다.



(그림 3-6-26) 모듈 복제 상세 화면

모듈 복제기능을 사용한 예는 (그림 3-6-27)과 같다.

① 농촌용수 물순환의 분석요소들이 다양하게 조합할 수 있도록 유역유입량 분석 모듈을 복제하고 저수지 연계 모듈을 새로 추가하여 기존 유역유입량 분석 모듈과 복제된 유역유입량분석을 연계하여 물수지를 분석한다.



(그림 3-6-27) 유역 유입량 분석 모듈 복제 예

6. 요약 및 결론

본 장에서 개발된 플랫폼은 운영체제 (Operating System, OS)에 종속되지 않고 다양한 OS에서 작동 할 수 있도록 Java 언어 기반으로 구축하였다. 각

모듈들이 연계되어 하나의 플랫폼에서 구동되고 최근 연구에서 개발된 기법을 반영한 신규 모듈을 작성하여 추가해 기존의 모듈과 비교하여 분석할 수 있도록 개발하였다. 본 장에서는 객체지향의 농촌용수 해석 모듈 및 동적 모의 플랫폼 초기버전을 개발하였고, 개발된 플랫폼에 대한 개발환경, 기본 개념, 객체 모듈, 그리고 플랫폼에 대한 내용을 정리하였다. 본 장에서의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 플랫폼은 유연성과 확장성을 고려하여 개발하였으며, 개발 언어는 Java이고 Eclipse IDE를 사용하여 개발하였다.
- ② 레고플레이트로 다양한 작품을 제작하듯이 개별 모듈을 언제든지 바꾸거나 추가하여 전체 시스템을 어느 현장에든 쉽게 적용 가능하도록 하였다.
- ③ 모듈 아바타에는 모듈 아이디, 모듈 타이틀 등이 표시되고 모듈의 정보 표시화면에는 모듈의 상세 정보가 표시된다.
- ④ 모듈 유형은 계산모듈, 입력자료 생성모듈, 출력 데이터 표출모듈이 있으며 TANK모형 분석 등 총 21개에 모듈을 개발 하였다.
- ⑤ 개발된 플랫폼에서는 플랫폼의 신규 프로젝트를 생성 할 수 있고 저장 할 수 있으면 기존에 저장된 프로젝트를 불러 올 수 있도록 구성하였다.
- ⑥ 개발된 플랫폼에서는 플랫폼의 Workbench에 모듈을 등록하고 개별 모듈을 실행시킬 수 있으며 신규 모듈 추가 등의 기능을 포함하였다.

개발된 플랫폼 모듈 구성에 따라 다양한 환경을 제공하고 신규 모듈을 추가할 수 있어 확장성이 뛰어나 다양한 현장에서 활용될 수 있다. 개발된 플랫폼 초기버전에 대한 사용자 설명서 (초안)는 <첨부 I>에 수록하였다.

제 7 절 농촌용수 물순환 해석 Framework 연계 기술 개발

1. 서 론

UN-Water (2007)에 따르면, 과거 100년간 물 이용 증가율은 인구 증가율 대비 두배 이상 증가하였다. 2025년에는 절대적인 물 부족 국가나 지역에서의 인구가 18억명에 달할 것으로 추정되고 있으며, 세계 인구의 2/3가 물 스트레스를 겪게 될 것으로 예상하고 있다.

농업용수는 전세계 물이용량의 70% 이상을 차지하고 있으며, 개발도산국의 경우에는 물이용량의 95%까지 농업용수로 사용하고 있다. 따라서, 가난, 기아, 그리고 지속가능한 환경보전과 관련된 지구환경 및 사회적 목표의 충족과 부정적인 악영향의 결과 초래를 최소화 하기 위해서는 효율적인 농업용수의 관리가 기본적으로 필요하다 (Molden, 2007).

농업용 저수지 유역에서의 효율적인 물관리를 위한 가능한 관리대안 도출을 위해서는 유역 물수지에 영향을 미치는 수문학적 요소의 기작에 대한 이해와 분석이 필수적이다. 그러나 농업유역시스템에서의 수문순환 과정의 복잡성과 시변동성 등을 고려할 때, 농업유역에서의 수문학적 요소 및 그 기작을 구명하는 것은 쉽지 않다 (Droogers et al., 2000).

모델링 기법은 과학과 공학의 다양한 분야에서 자연현상을 수학적으로 표현하는 일반적인 방법이다. 컴퓨터를 이용한 모델링 기법은 농업 수자원을 포함하는 환경적 분야에 널리 이용되고 있다 (Argent et al., 2006). 강우-유출 기작에 내재되어 있는 구성인자들은 비선형성, 시변동성, 공간분포 등의 복잡성을 가지고 있다. 따라서, 모델링 기법의 적용은 복잡한 강우-유출 기작을 구명하고, 농업유역에서의 수자원을 종합적으로 관리하기 위한 최적의 대안을 제시할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로, 물관리와 관련된 많은 연구가 모델링 기법 기반에 의해서 수행되었으며, 이에 따른 수많은 모형과 소프트웨어가 개발되어져 왔다.

과거 수 십년 동안, 소프트웨어 공학과 상업용 소프트웨어 분야에서는 객체지향 개념 (object-oriented concepts) 기반의 모듈식 소프트웨어 (modular-style software) 형태로 시스템 개발이 이루어졌다. 객체지향기법은 사용상의 유연성 향상과 모듈 재이용성을 지원할 수 있는 독립된 개별 모형인 모듈들 (modules)로 시스템을 구현하는 개념이다 (Rumbaugh et al., 1991; Clements, 1995; Zeigler, 1995; Maxwell, 1999; Argent et al., 2006). 모델링 도구 (tools) 개발시에, 이산화된 시간과 객체들을 처리하는 과정에서 발생할 수 있는 다양한 문제는 객체 이론 기반의 접근 방법으로 해결할 수 있으며, 적절한 소프트웨어 공학 설계 및 개발 방법을 사용함으로써 쉽게 처리할 수 있다 (Argent et al., 2006). 이와 같은 새로운 객체지향 기법은 객체 묶음 (suites)이나 모듈 라이브러리 (libraries of module)을 통합하여 연동시켜 주는 모델링 프레임워크 (modeling frameworks)의 개발을 가져왔다. 모델링 프레임워크는 환경문제와 관련된 현상에 대한 기본적인 자연 특징을 반영하는 데 적합하도록 설계된 구조들을 갖고 있다. (Muhanna, 1994; Guariso et al., 1996; Bennett, 1997; Reed et al., 1999; Argent et al., 2006).

HarmonIT (2002) 연구팀의 정의에 따르면, 모델링 프레임워크는 일반적으로 모형 선정에 관심을 갖는 일반 사용자 (end users)에게 어떤 선택을 할 수 있도록 하는 개

방향 시스템 구조를 갖는다. 반면에, 통합 모델링 시스템 (integrated modeling systems)은 특정 시스템이나 물리영역의 일련의 과정을 나타내기 위하여 연결된 모형들의 집합체를 의미한다. 다시 말해서, 통합모델링 시스템은 일반적으로 새로운 모델링 도구를 제공하는 반면에, 모델링 프레임워크는 일관된 방식으로 조직화되거나 연동되어 질 수 있도록 기존 모형이나 상속 모형을 처리하는 방법을 제공한다. 현재 존재하는 대부분의 모델링 기법은 필요로 하는 연구분야 영역에서의 요소 그룹 (component)을 모두 포함하고 있는 통합모델링 시스템에 기반을 두고 있다. 그러나, 모델링 프레임워크가 유역관리 분야에서 널리 이용되고 있음에도 불구하고, 농업용수 물순환 해석과 관련된 컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크는 프로그래밍보다는 시스템을 구축하기 위한 설계에 중점을 둔 모듈러 모델링 개념으로부터 구현된다. 프레임워크에서의 컴포넌트는 기본적으로 정의된 작업이 할당된 단위개체 (unit)로서, 본질적으로 일원화된 관점에 따라 사용되며, 다른 컴포넌트와 연계하여 모델링 시스템을 구성할 수 있다 (Argent, 2006).

컴포넌트 기반 모델링 체계의 처리과정은 모델링 시스템 내에서 다른 전산적 계산 객체와 플러그 앤 플레이 (plug-and-play) 방식으로 손쉽게 연동하여 이용할 수 있는 전산 객체로 설계되어 수행되어 진다. (Castronova and Goodall, 2010). 객체지향 모델링 (Object-oriented modeling) 기법은 객체 지향 해석, 설계, 그리고 개발을 위해 구축된 객체 이론과 기술을 바탕으로 컴포넌트 기반의 모델링 기법 구현을 지원한다. 시스템의 기본 개체들 (entities)은 클래스 (class)와 클래스 계층을 구성하는 요소들이며, 시스템 내에서 정의된 속성과 할당된 작업을 수행한다 (Argent, 2006).

유역규모의 모델링 프레임워크는 처리과정에서의 피드백, 자료전송, 소스코드의 호환성 등의 한계를 극복하기 위하여, 다양한 모듈러 또는 컴포넌트 체계를 가지고 일부 개발되었거나 개발 중에 있다. 이러한 프레임워크에는 Modular Modeling System (MMS) (Leavesley et al., 1996), Dynamic Integration Architecture System (DIAS) (Sydelko et al., 1999), Interactive Component Modeling System (ICMS) (Rizzoli et al., 1998; Reed et al., 1999), Spatial Modeling Environment (SME) (Costanza & Voinov, 2003), The Invisible Modeling Environment (TIME) (Rahman et al., 2003, 2004), Framework for Risk Analysis in Multimedia Environmental Systems (FRAMES) (Whelan et al., 1997), Objective Modeling System (OMS) (David et al., 2002), 그리고 European Open Modeling Interface and Environment (OpenMI) (Gijssber et al., 2002) 등이 있다.

유역단위 적용을 위한 컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크는 상속성, 확장성, 호환성 등의 유연한 모델링을 제공하는 데 한계가 있으며, 그러한 이유로 수자원과 환경분야에 적용된 예는 매우 제한적인 실정이다. 더욱이, 수자원 분야 영역에서의 유역규모의 컴포넌트 기반 프레임워크의 개발 예는 거의 없는 실정이다. 또한, 기존에 존재하는 프레임워크는 특정 문제를 해석하기 위한 상속 모형 (legacy model)을 사용할 수 없으며, 특정한 분야 해석을 위해 구축된 모형을 용이하게 연동할 수 있는 호환성/확장성

이 결여되어 있다. 따라서, 이러한 프레임워크는 특정한 처리과정을 모델링하는데 있어서 효율적/효과적 측면에서 어려움이 있다.

유역 규모를 대상으로 하는 농업수자원 모델링 분야에 적합하고 이용 가능한 컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크는 현재 시점에서는 개발된 바가 없다고 해도 과언이 아니다. 특히, 컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크의 적용 기법은 관개저수지 운영조작과 논 포장의 관개배수 기작 특징 등의 지역성과 복잡성을 반영하여 고려해야 하는 농업유역의 특성상 필요함에도 불구하고, 농업유역 규모의 수자원 해석 및 관리 분야에서는 그 적용 예를 찾아보기 힘들다. 따라서, 유역 규모의 농업수자원의 체계적 계획과 효율적인 관리를 위해서는 모델개발자나 일반사용자가 개별 객체들을 플러그 앤 플레이 방식으로 시스템을 구현할 수 있도록 대안적 접근 방식을 제공할 수 있는 컴포넌트 기반의 모델링 프레임워크의 개발이 필요하다.

본 장에서는 ① 농촌용수 물순환 모형 (COMFARM)의 개요 및 구조, ② 농촌용수 물순환 모형 개발을 위한 설계 내용, ③ 농촌용수 물순환 모형 컴포넌트 구성에 대한 설명으로 구성되어 있으며, Framework 기반의 농촌용수 물순환 해석 모형 개발을 위한 기반기술, 설계 내용 등을 정리하고자 한다.

2. 농촌용수 물순환 해석의 Framework 개발 (COMFARM)

2.1. OpenMI Framework 개요

(그림 3-7-1)은 농촌용수 물순환 해석 모형을 OpenMI Framework 기반 하에서 개발하고 실행하기 위한 개발 순서도를 나타내고 있다.

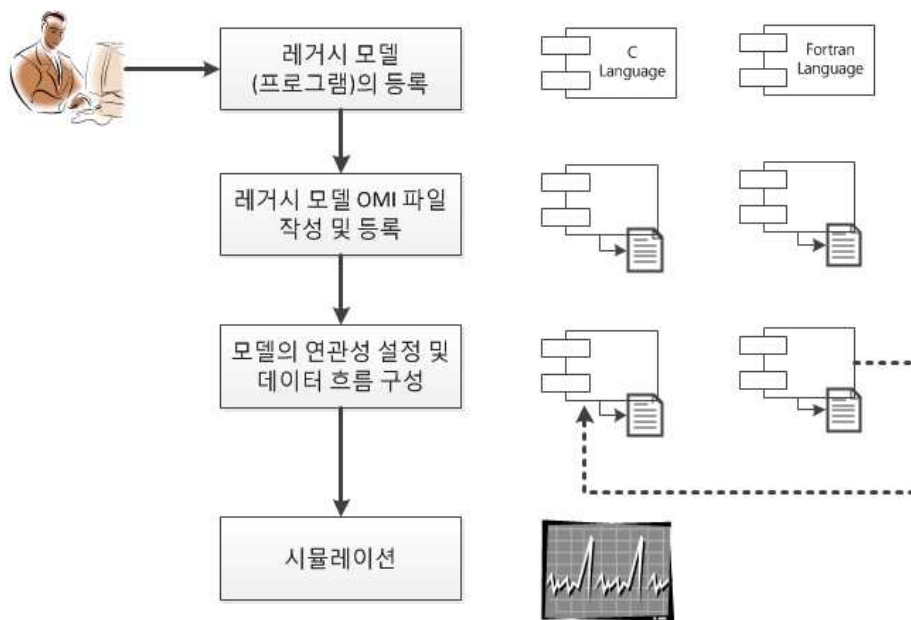
① 레거시 모형 (프로그램)의 등록 : OpenMI Framework의 가장 큰 장점은 기존 프로그램을 통합하는데 있어서 소스 레벨에서의 수정이 아니라 기존 프로그램은 그대로 두고 입/출력 매개변수 및 파일을 수정하는 Wrapper를 두어 통합할 수 있다는 것이다. 따라서 “저수지 물수지” 분석 모듈을 개발하기 위해 관련된 프로그램 (예를 들어 저수지 유입량 모듈, 농업용수 공급량 및 배수량 모듈)을 새롭게 개발하는 것이 아니라 기존 분석 모듈을 가져와 바로 통합하여 이용할 수 있다는 것이다.

② 레거시 모형 OMI 파일 작성 및 등록 : 기존 개발된 프로그램을 이용하여 새로운 모형으로 통합하기 위해서는 기존 프로그램의 입력자료 형식, 출력자료 형식, 데이터의 형태 등에 대한 정보를 시스템에 제공하여 모듈 간 데이터 연동이 가능하도록 구성해야 한다. OMI 파일은 이러한 기존 프로그램 모듈의 기본 정보 및 입·출력 자료의 형식에 대해 정의한다. 따라서 OMI 파일은 통합하고자 하는 대상 프로그램 별로 각기 구성되어야 하며, 시스템 등록과정을 거치면 기존 프로그램의 실행파일의 경로, 입력 자료의 형태, 출력자료의 형태가 시스템에 정의된다.

③ 모형의 연관성 설정 및 데이터 흐름 결정 : 등록된 기존 레거시 프로그램의 실행 순서 및 입출력 연관성을 명시하는 작업이 필요하다. 예를 들어, “저수지 물수지 모듈”은 입력 값으로 기상인자와 “저수지 상류 유입량” 분석 자료가 필요한데, 레거시 모형

으로 “저수지 유입량 모듈”과 “저수지 물수지 모듈”이 등록되었다면, “저수지 유입량 모듈”의 출력결과가 “저수지 물수지 모듈”의 입력 자료로 이용될 수 있도록 모듈 간 연관성을 규정하는 과정을 거친다.

④ 시뮬레이션 : 모듈 간의 연관성이 설정되면, 등록된 모듈 중에서 가장 마지막으로 수행되어야 할 모듈을 선정해 “트리거”로 정의한다. 트리거란 시뮬레이션을 수행하기 위한 최초의 모듈을 의미하며, 만약 대상 모듈이 입력 자료로 다른 모듈을 참조하고 있다면 트리거는 최상위 데이터 제공 모듈을 검색하여 그 모듈에서부터 시뮬레이션이 시작하도록 구성한다. 만약, 일정 시간동안 연속해서 시뮬레이션이 수행되어야 한다면, 트리거는 대상 시간은 단위시간으로 분리하고 하나의 단위시간에서 모든 프로세스가 수행되도록 한 뒤 다음 단위시간으로 이동하여 전체 프로세스를 수행한다.



(그림 3-7-1) OpenMI기반 모형의 개발 과정

OpenMI Framework는 다음과 같이 8개의 주요 모듈로 구성되어 있으며, (그림 3-7-2)와 같다.

① OpenMI Framework : 모듈 간의 데이터 연동을 정의하기 위한 Interface를 정의한다. 대표적으로 ILinkableComponent, ILink, IQuantity, IElementSet, IDataOperation, ITime, IValueSet 등의 Interface를 정의한다.

② Legacy Module Manager : 기존 모듈의 위치, 설명, 이름, 입력/출력 형태, 데이터의 정의 등에 대한 내용을 관리한다. Legacy Module Manager의 관리대상 클래스는 ILinkableComponent를 상속한다. 시스템이 처음 구동되면, {Home}/workspace/omi.conf 파일을 읽어 현재 관리대상이 되는 모듈의 OMI 파일 위치를 파악하고 각각의 OMI 파일을 읽어 등록된 프로그램 모듈 정보를 메모리상에 불러온다. Legacy Module

Manager는 시스템 구현에 편리하도록 “Singleton Pattern” 구조로 구현되어 있다.

③ Common Data Manager : 기상자료, 토양자료, 유역특성 자료 등의 데이터베이스 혹은 파일 형태의 데이터를 로딩하고 관리하기 위한 기능을 수행한다. 시스템이 처음 구동되면 {Home}/conf/database.conf 파일을 읽어 현재 관리대상이 되는 데이터베이스 혹은 파일 정보를 읽어 해당 정보를 메모리상에 불러온다. Common Data Manager는 시스템 구현상의 편리성을 위해 디자인 패턴 중에 “Singleton Patter”을 이용하여 구현된다.

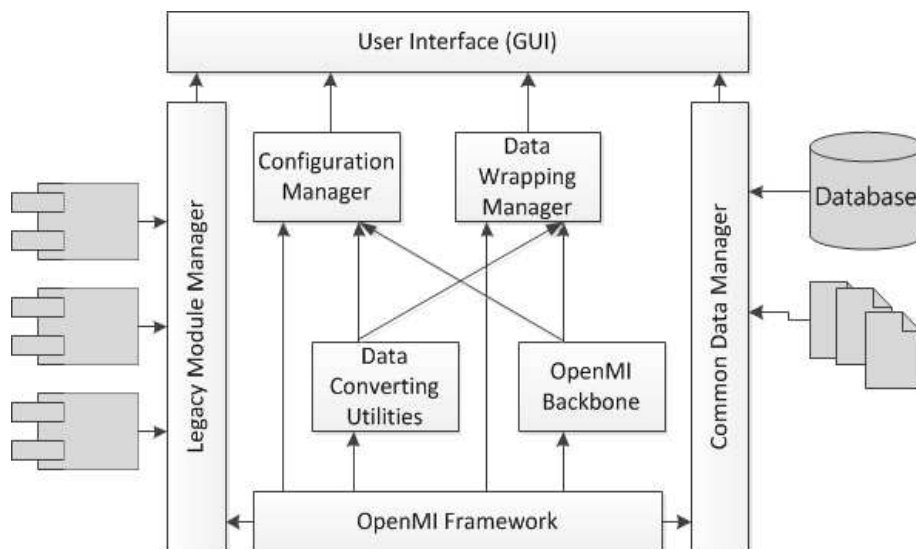
④ Data Converting Utils : 모듈 간의 데이터 연동을 위해 공간데이터 (점, 라인, 평면, 3차원 등)간의 데이터 변환, 시간 데이터 (범위, 특정) 간의 데이터 변환, 데이터 단위 변환 등의 유틸리티 라이브러리를 제공한다.

⑤ OpenMI Backbone : 매개변수, 데이터, 데이터연동, 데이터 관리 등 OpenMI에서 정의한 Interface를 구현한 클래스를 포함한다. 시스템의 기본 라이브러리로 모든 컴포넌트는 Backbone 패키지를 Import하여 구현된다.

⑥ Configuration Manager : 기존 모듈을 불러와 새로운 형태의 시스템을 구성하거나 몇 개의 모듈을 이용해 컴포넌트 그룹을 구성하고 구성된 컴포넌트 그룹을 조합하여 새로운 컴포넌트 그룹을 구성하는 다층 구조의 모듈 구성 등을 제공한다. Configuration Manager는 관리자가 GUI를 통해 모듈을 등록하고 모듈 간의 연관관계를 구성하는 과정을 구현한 것이다.

⑦ Data Wrapping Manager : 기존 모듈 간 데이터 연동 (입/출력 자료의 변환을 통해 데이터 전달)을 지원하는 클래스로 구성된다. Data Wrapping Manager는 OpenMI Framework의 IElementSet을 구현 (Implement)한 클래스를 최상위 객체로 하며 다른 모든 하위 클래스는 이 클래스를 상속한다.

⑧ User Interface : 사용자가 쉽게 기존 모듈을 등록하고 연관관계를 구성하고 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 지원하는 GUI 컴포넌트를 포함한다. GUI 레이아웃은 다음과 같은 형태로 구성된다.



(그림 3-7-2) OpenMI의 주요 모듈

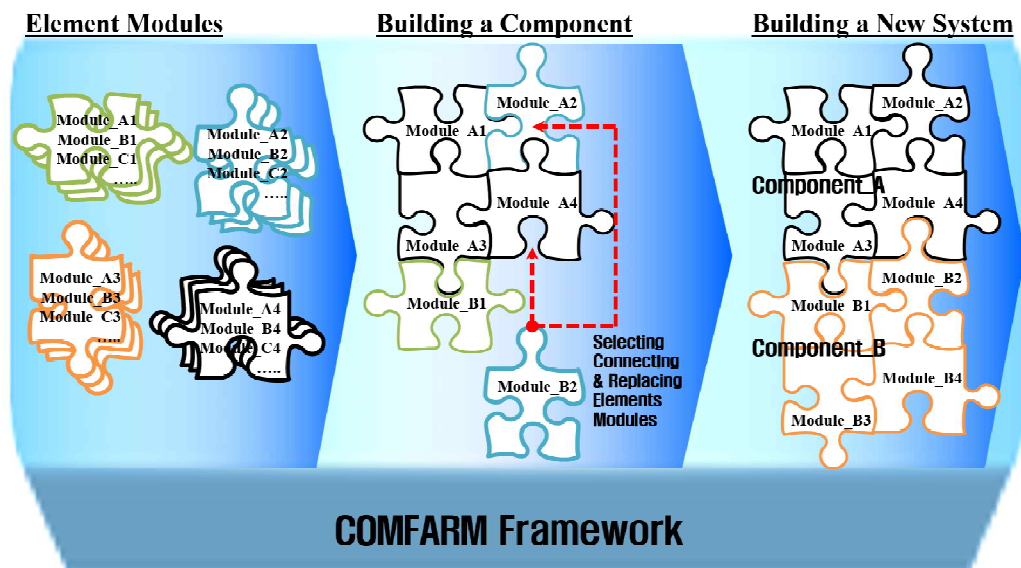
2.2. COMFARM Framework 개발

본 연구에서는 농촌용수 물순환 요소 및 기법을 각각의 컴포넌트로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 특정 문제에 맞게 필요한 모듈을 선정하고 배열하여 맞춤형 모델을 구축할 수 있는 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COMponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)을 개발하였다.

COMFARM은 이클립스 (Eclipse) 통합 개발 환경 (Integrated Development Environment, IDE) 에서 자바 언어를 통해 개발되었으며, 이로 인해 자바 런타임 환경 (Java runtime Enrionment, JRE)이 구축되어 있어 운영체계에 관계없이 동일하게 시스템을 운용할 수 있다. COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을 인터페이스를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었다. 이러한 COMFARM의 구조는 응용 프로그램, 요소 모형, 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 모델링 시스템을 개발하고 통합할 수 있도록 설계된 경량화된 모델링 프레임워크이다. 이러한 구조를 가진 COMFARM은 모형 요소/컴포넌트의 재사용성을 높일 수 있고, 필요로 하는 기술 영역/분야에서의 모든 요소들에 대해서 상호 연계가 매우 용이하며, 응용 프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있는 특징을 가지고 있다.

이러한 개념은 레고 플레이트와 레고 블록을 단순하게 조립하여 다양한 작품을 제작하는 것과 비슷하다. COMFARM 프레임워크는 레고블록의 작품 제작과정과 매우 유사한 방식으로 모델링 시스템을 구성할 수 있다. COMFARM은 독립된 모듈들로 구성된 각각의 컴포넌트들을 플러그 앤 플레이 방식으로 사용자가 조합, 분해, 추가, 제거, 교체할 있으며, 특정 연구 분야에서의 새로운 시스템을 구성할 수 있도록 각각의 컴포넌트를 선택, 대체, 조합하여 확장할 수 있다.

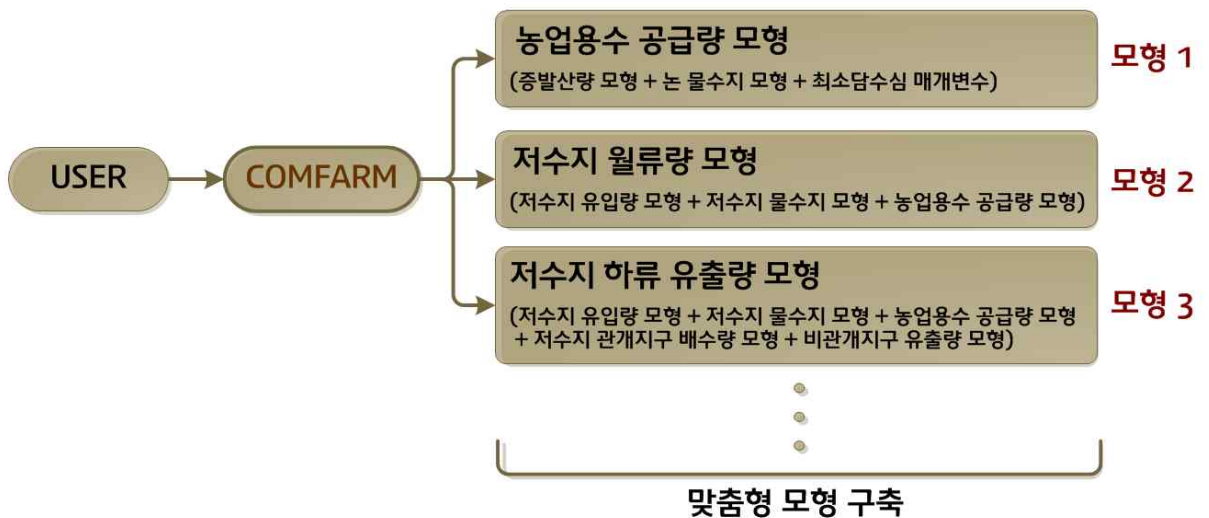
COMFARM의 기본 개념은 (그림 3-7-3)에서와 같다.



(그림 3-7-3) COMFARM의 기본 개념

COMFARM 프레임워크는 모형 개발자 또는 일반 사용자가 자체적으로 모듈을 개발/수정하거나 기존의 요소 모듈을 쉽게 사용할 수 있도록 지원하며, 수많은 요소 모듈을 선택, 조합, 대체함으로써 연계 가능한 요소들을 생성할 수 있도록 하고, 이를 맞춤형 모형으로 구성하여 특정 관심 적용 분야에 적합한 다양한 모델링 시스템을 쉽게 구성할 수 있도록 지원한다. (그림 3-7-3)에서와 같이, COMFARM상의 모델링 시스템은 연계 가능한 다양한 모듈들로 구성된 컴포넌트들로 구성된다. 따라서, COMFARM은 요소 기술 컴포넌트를 조합하여 농촌용수 물순환 해석 등과 같은 사용자에 따른 맞춤형 모형을 구성하는 프레임워크를 제공한다.

COMFARM을 이용한 농촌유역에서의 물순환 해석의 개념적 접근은 다음과 같다. 저수지를 포함하는 농촌유역은 저수지 상류유역, 저수지, 저수지 하류유역으로 구분되며 각각의 물순환이 복합적으로 서로 연계되어 복잡한 특징이 있다. 하지만 기존에 널리 사용되던 SWAT이나 HSPF와 같은 모형은 우리나라의 농업용 저수지 운영기작과 논외의 물수지 등의 우리나라 유역의 특징을 반영하지 못 하여 모의치와 실측치가 상이한 연구 결과를 도출하게 된다. 우리나라에서 기 개발된 DIROM 및 HOMWRS 등의 모형은 개발 후 시간이 흘러 최신의 모의 기법을 반영하지 못 하고 있고, 농촌용수 물순환 주요 모의 요소 중 모의하지 못 하는 요소도 존재하며, 시스템적인 문제점도 존재한다. 사용자가 농촌유역을 모델링하는 목적은 저수지 상류유역의 유출량만을 모의하는 경우, 저수지의 방류량만을 모의하는 경우, 농업용수 공급량만을 모의 하는 경우, 그리고 여러 요소를 연계하여 하류 유출량을 모의하는 경우 등으로 구분할 수 있다. 사용자는 COMFARM을 통해 (그림 3-7-4)와 같이 다양하게 제작된 입·출력 모듈, 모의 모듈들을 손쉽게 연결하여 사용자 맞춤형 모형을 설계할 수 있다. 또한, COMFARM에 기 내재되어 있는 모듈이외에도 사용자가 자체적으로 모듈을 개발하여 수정하거나 추가할 수 있다.

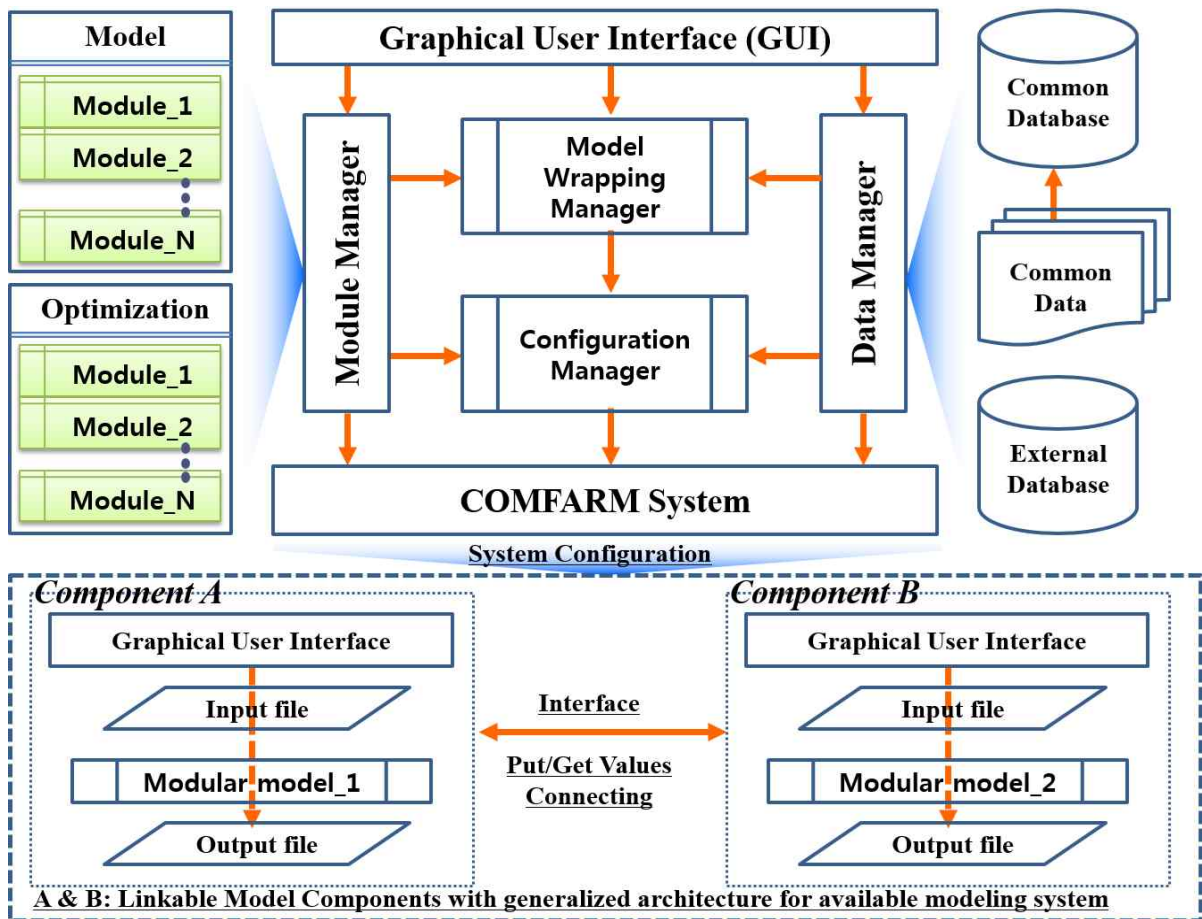


(그림 3-7-4) COMFARM을 통한 맞춤형 모형 구축

2.3. COMFARM Architecture

COMFARM은 일련의 동적 모듈을 조합하고 통합할 수 있는 구조로서, 모델링 시스템 개발을 위한 유연성, 확장성, 재이용성, 모듈성 등을 극대화하였으며, 객체지향 구조를 갖는 각각의 모듈에 대해 서로 연동하여 시스템을 구성할 수 있도록 설계되었다. 즉, COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을 COMFARM Interface를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었다. 이러한 COMFARM의 구조는 응용프로그램, 모형, 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 개발하고 통합할 수 있으므로 모형의 재사용성을 높일 수 있고 응용프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있다.

COMFARM의 주요 구성 모듈 (architectural module)은 (그림 3-7-5)에서와 같이, COMFARM 프레임워크 모듈 (COMFARM Framework Module or COMFARM System), 환경 관리자 (Configuration Manager), 모형 래핑 관리자 (Model Wrapping Manager), 자료 관리자 (Data Manager), 모형 래핑 관리자 (Model-wrapping Manager), 그리고 그래픽 사용자 인터페이스 (Graphical User Interface, GUI) 등 총 6개로 구성되어 있으며, 각각의 기능과 역할은 다음과 같다.



(그림 3-7-5) COMFARM의 아키텍처

COMFARM 프레임워크 모듈 (COMFARM 시스템)은 전반적인 도메인 모델링을 실행하기 위한 주요 구성 모듈 간의 인터페이스와 시스템 환경을 정의한다.

환경 관리자는 기존 모듈을 불러와 새로운 형태의 시스템을 구성하거나 몇 개의 모듈을 이용해 다양한 컴포넌트 그룹을 구성하고, 구성된 컴포넌트 그룹을 조합하여 새로운 컴포넌트 그룹을 구성하는 다층 구조의 시스템 구성 등을 정의하고, 새로운 모델링 시스템을 구현한다. 환경 관리자모듈은 일반사용자가 GUI를 통해 모듈을 등록하고 모듈 간의 연관관계를 구성할 수 있도록 하는 기능을 제공한다.

모형 관리자는 모의모형의 서브모듈과 최적화 서브모듈로 구성되며 농촌용수 물순환 요소의 모의기법들을 정의·관리하고, 모형의 보정 과정에서는 매개변수 최적화를 수행한다. 또한, 모형 관리자는 SWAT 모형, TANK 모형, Penman-Monteith 식, 그리고 물수지 식 등과 같이 잘 알려진 모형 등에 사용되는 주요 함수를 이용하여, 유역 유출량, 저수지 물수지, 관개배수량 등을 모의할 수 있는 새로운 모형 또는 모델링 시스템의 구현을 정의하고 관리한다. 모형 관리자는 일관된 방식으로 모듈러 모델들을 구성하고 연동이 가능하도록 하며, 외부제어 도구와 상관없이 모든 모듈러 모델의 데이터를 교환하고 계산할 수 있는 기능을 제공한다.

자료관리자는 SQL (Structured Query Language, Microsoft SQL Server, 2012)로 작성된 관계형 데이터베이스시스템 (Rational Database-Management System, RDBMS) 기반의 JAVA (Oracle Java Standard Edition, Ver. 7) 언어로 개발되었다. 자료관리자 모듈은 중앙 데이터베이스로 ASCII 파일로 변환하여 연동시키며, 데이터의 표준화를 위한 유틸리티 라이브러리를 제공한다. 자료 관리자는 기상자료, 유역특성, 영농자료 등의 데이터베이스에서 데이터를 불러오고 관리하는 기능을 수행하며, 자료 표준화를 위한 유틸리티 라이브러리를 제공한다. 자료 관리자는 사용자와 데이터베이스 또는 데이터베이스간의 체계적이고 일관된 인터페이스를 제공하며, 데이터베이스의 정의, 구축, 검색, 갱신, 그리고 관리 등을 수행한다. 각각의 모듈에서 계산되거나 구축되어지는 모든 자료는 자료관리자에 의해 저장되고 관리된다. 결과적으로 데이터베이스와 모듈러 모델간의 표준화된 인터페이스는 자료관리 모듈을 통해서 수행되어진다.

모형 래핑 관리자는 기존 모듈, 컴포넌트 간 표준화된 입출력 라이브러리를 이용하여 입·출력 자료의 변환을 수행함으로써 데이터 연동 (전달)이 수월하도록 연결해주는 기능을 제공한다. 모듈러 모델의 국가 또는 지역적 특성을 반영하여 모형/모듈의 확장성을 담보하기 위해서, 모듈러 모델은 자료의 시공간성, 상이한 자료 표준, 소스코드에 내재되어 있는 차이점 등과 함께 다양한 형태의 입출력 자료 연동이 가능해야만 한다 (HarmonIT project, 2002). 따라서, COMFARM 내의 모형 래핑 관리자는 농촌용수 해석과 지역적 특성에 대한 복잡성을 최대한 완화시킬 수 있도록 기존 요소 모듈, 모듈러 모형, 다양한 컴포넌트, 그리고 다른 형태의 모듈과 자료들 간의 연동을 지원한다.

GUI 시스템 모듈은 컴퓨터에 대한 지식이 부족한 일반사용자가 쉽게 기존 모듈을 등록하고 연관관계를 구성하고 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 지원하는 기능을 제공하는 사용자 편의 시스템을 제공한다. 이 모듈은 워크스페이스 윈도우 상에서 아이콘을 끌어놓기 (drag and drop)하여 사용자로 하여금 다양한 모듈과 컴포넌트를 쉽게 연동

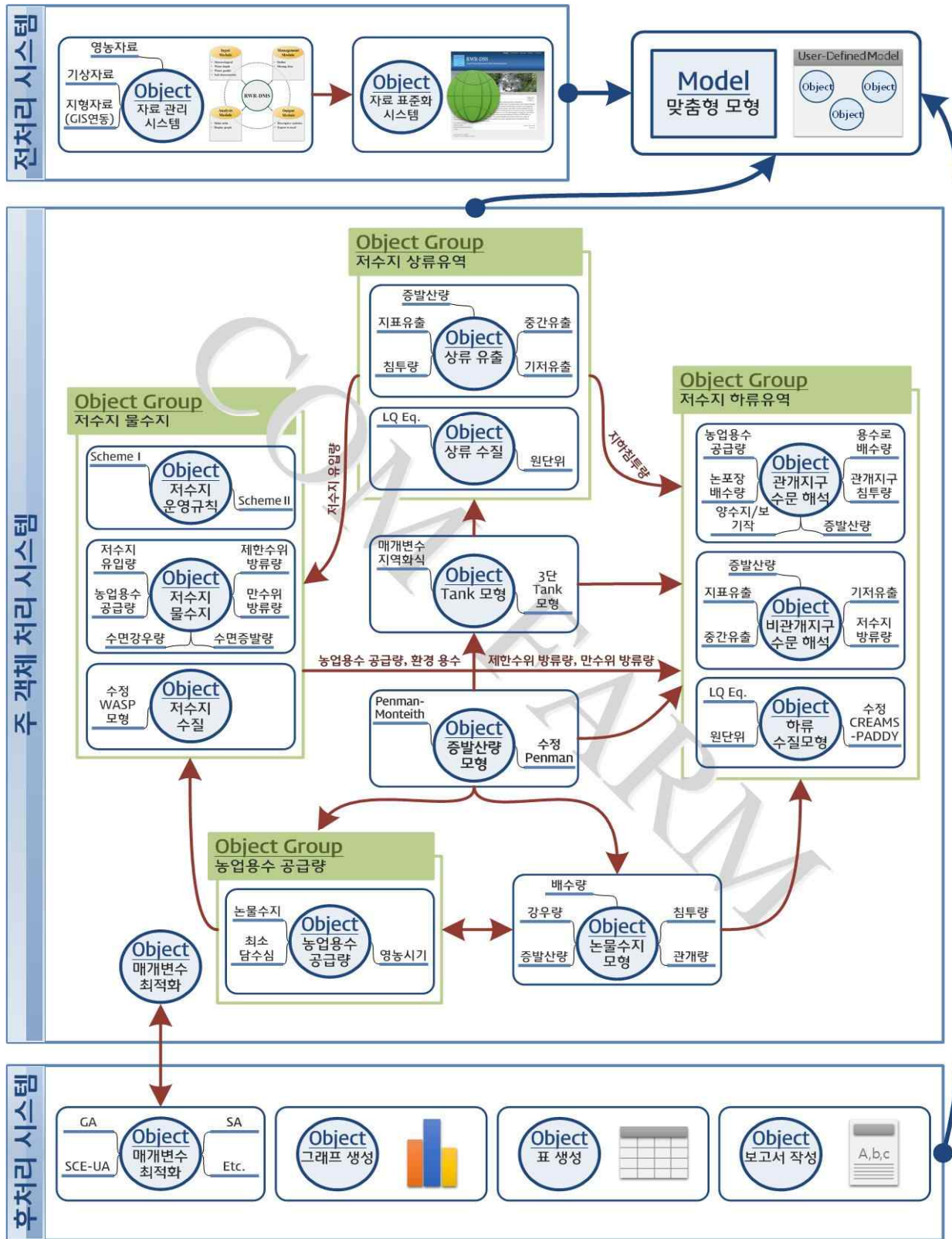
할 수 있도록 하고, 사용자가 구성하고자 하는 모델링 시스템을 구현하도록 지원한다. 사용자는 연동 처리과정을 시각화할 수 있고, 아이콘을 이용하여 직관적으로 다양한 특성을 부여할 수 있다. 또한, 사용자는 GUI를 통해 정보나 자료를 입력할 수 있고, 모듈러 모델의 입력자료로 변환할 수 있다. GUI 시스템 모듈은 입출력 자료와 모듈연계기능을 표나 그래프로 도시할 수 있도록 지원하며, 사용자의 편의를 제공하기 위하여 모형의 적용을 위한 입력값의 기본 값을 대화창에서 기본적으로 제시해 준다.

모델링 시스템의 구조는 일반적으로 컴포넌트와 컴포넌트간의 연결도구 (connector)로 구성된다 (HarmonIT, 2002). (그림 3-7-5)에서와 같이, COMFARM 상에서의 연결 가능한 모델 컴포넌트는 사용자 인터페이스와 모듈러 모델로 구성된다. 모듈러 모델은 특정 대상 연구분야에 있어서 상호연계된 일련의 요소 모듈들의 조합으로서, 메타 데이터를 포함하는 해당 분야 모듈들을 순서대로 실행할 수 있도록 구성되어 있다.

또한, 사용자 인터페이스를 통해 제공되는 정보는 모듈러 모형의 입력자료로 변환되어 제공된다. 사용자는 다양한 옵션을 선택하여 필요로 하는 모듈을 실행할 수 있다. 컴포넌트는 구축된 입력자료를 연결하고, 모듈러 모형을 실행하여 필요로 하는 계산과 모의를 수행하며, 그 결과를 출력하여 표나 그래프로 도시할 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 모델링 시스템은 연계 가능한 컴포넌트 모듈을 조합하여 이용함으로써, 사용자 중심의 맞춤형 시스템을 제공한다.

따라서, COMFARM은 상기의 6개의 주요 시스템 모듈을 바탕으로, 개발자 또는 일반사용자가 필요로 하는 특정 영역 분야에 대하여, 다양한 요소 모듈을 조합하여 구성된 연계 가능한 컴포넌트를 연동함으로써 사용자 맞춤형 모델링시스템을 구축할 수 있는 도구를 제공한다.

(그림 3-7-6)은 COMFARM Framework을 이용하여 구축된 농촌용수 물순환 해석 시스템을 보여주고 있다. 농촌용수 물순환 해석 시스템은 전처리 시스템, 주 객체 처리 시스템, 후처리 시스템으로 크게 구분된다. 전처리 시스템에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 방대한 자료를 관리할 수 있는 자료 관리 및 표준화 시스템 (AWR-DMS, AWR-DMT)과 연동하여 맞춤형 모형에 필요한 입력 자료 (기상, 지형, 영농자료)를 제공하며, 주 객체 처리 시스템에서는 객체 지향 모델링 기법 기반의 플랫폼을 통해 사용자의 이용 목적에 맞는 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하고, 후처리 시스템에서는 사용자가 구축한 맞춤형 모형의 매개변수를 자동 보정 및 검증하는 최적화 모듈과 그래프, 표, 보고서를 출력할 수 있는 모듈을 제공한다. 자세한 설명은 자료 관리 및 표준화 시스템 (AWR-DMS, AWR-DMT)은 [제 3 장 제 8 절]에, 맞춤형 모형을 구축하기 위한 플랫폼은 [제 3 장 제 6 절]에, 해석 기법에 관한 설명은 [제 3 장 제 1, 2, 3 절]에, 그리고 매개변수 최적화 모듈은 [제 3 장 제 4 절]에 서술되어 있다.



(그림 3-7-6) COMFARM 기반 농촌용수 물순환 해석 시스템

2.4. COMFARM Interface 설계

COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을

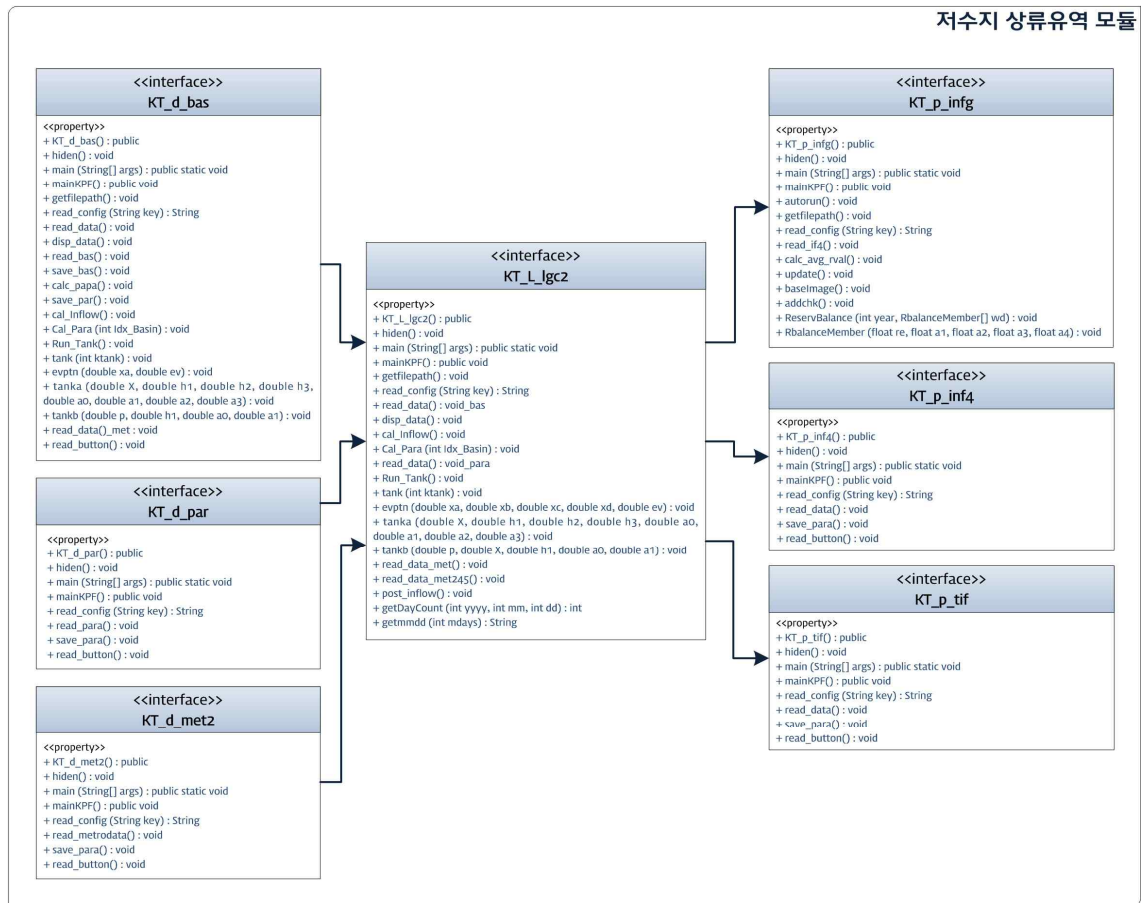
COMFARM Interface를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었다. 이러한 COMFARM의 구조는 응용프로그램, 모형, 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 개발하고 통합할 수 있으므로 모형의 재사용성을 높일 수 있고 응용프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있다. <표 3-7-1>은 COMFARM에서 정의하는 다양한 Interface를 나타내고 있다.

<표 3-7-1> COMFARM의 Interface 정의

Interface		설명
ID	이름	
TBA	유역면적입력	분할된 유역의 면적 및 토지 이용 비율 입력
TPA	Tank 매개변수 설정	분할된 유역의 Tank 모형 매개변수 설정
TMT	기상자료	기상자료 생성
TMT1	기상자료 (격자)	기상자료를 격자 형식으로 작성
TMT2	기상자료 (엑셀)	기상자료를 엑셀 파일 형식으로 작성
TNK	유역 유입량 분석	Tank 모형을 이용하여 유역유입량을 분석
TYI	연간 일별 유입량 출력	Tank 모형으로 분석한 연간, 일별 유입량을 도시화
TAV	일별 연속유입량	Tank 모형으로 분석한 전 기간 일별연속유입량을 도시화
TPI	유역 유입량 출력	유역유입량을 그래프로 나타냄
WBL	저수지 분석	Tank 모형으로 분석한 유역유입량, Penman-Monteith 식으로 산정한 일별수요수량, 강우량으로 물수지 분석
WRC	저수지 내용적	저수지 내용적 곡선 도시화
CWL	현재 저수위	현재저수위 도시화
WBG	저수지 물수지 출력	저수지 물수지를 그래프로 나타냄
WRT	물수지 분석 결과	물수지 분석 결과를 도시화
RDF	기상자료 (증발산량)	증발산량 식에 사용하는 기상자료 생성
REQ	농업용수 공급량 계산	증발산량 식을 사용하여 공급량 분석
RCF	작물계수	증발산량 식에 필요한 작물계수를 입력
RAV	일별 공급량	증발산량 식 계산결과로 출력된 일별 공급량을 도시화
RDQ	생육기 수요량	증발산량 식으로 산정한 생육기 수요량을 도시화
PPW	필요수량 평균	증발산량 식으로 산정한 필요수량 평균을 도시화
PWB	일별 공급량	증발산량 식으로 산정한 일별 공급량을 그래프로 도시화
HAI	관개지구 수문해석	저수지 하류 관개지구의 수문 순환을 해석
HAN	비관개지구 수문해석	저수지 하류 비관개지구의 수문 순환을 해석
WML	하류 수질모형	저수지 하류 논 포장의 수질 모의

저수지 상류유역 모듈은 저수지 상류유역의 유출량을 산정하는 Interface로 구성되어 있다. 유역의 기상자료, 분할된 유역의 면적 및 토지 이용 비율 입력하여 Tank 모형 매개변수 등의 입력 자료를 구축하는 Interface (KT_d_bas, KT_d_par, KT_d_met2), Tank 모형을 이용하여 유역유입량을 산정하는 Interface (KT_L_lgc2), 유출량 결과를

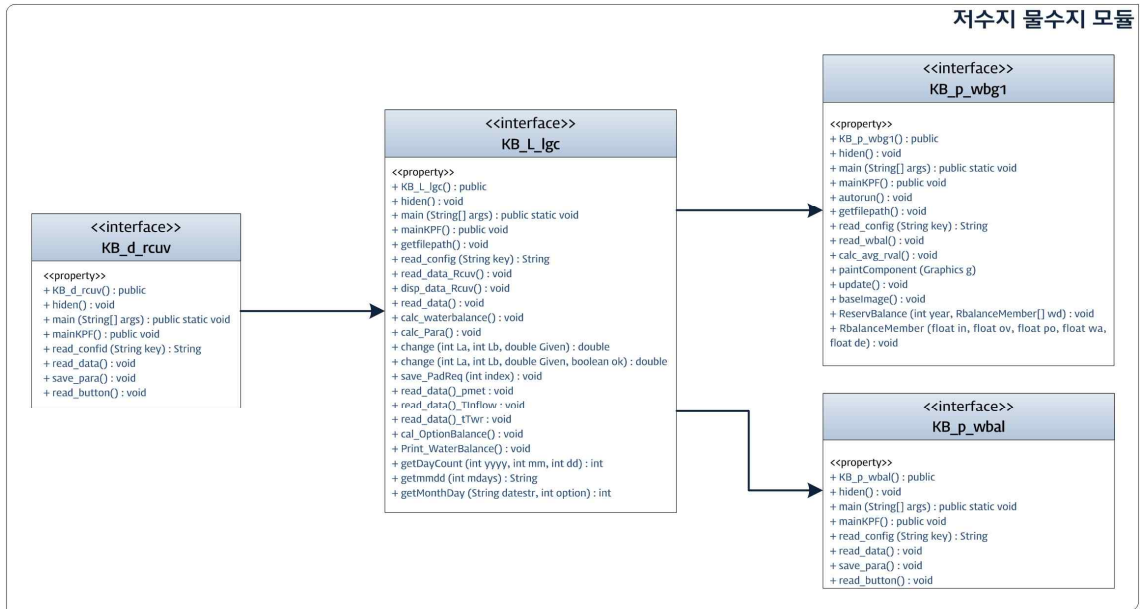
기간별로 출력하는 Interface (KT_p_infg, KT_p_inf4, KT_p_tif)로 구분된다 (그림 3-7-7).



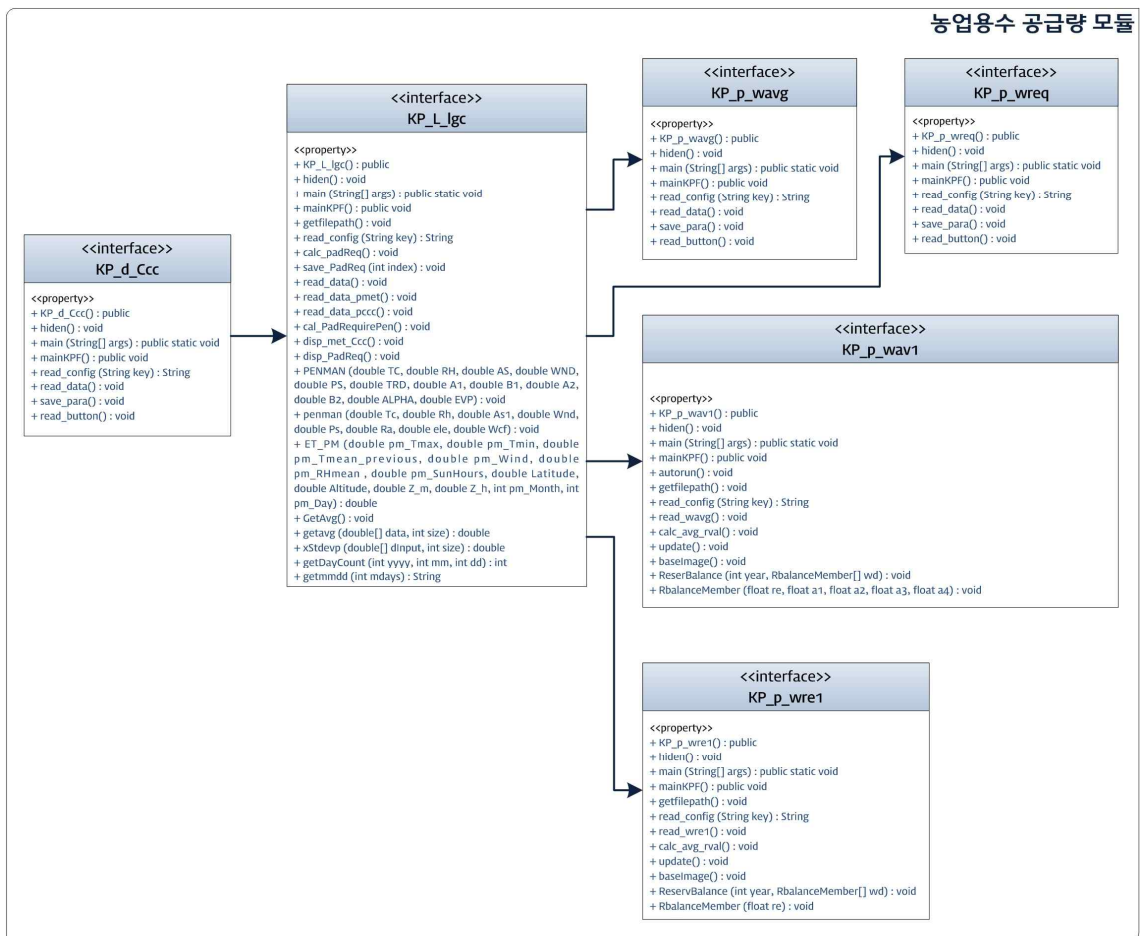
(그림 3-7-7) 저수지 상류유역 Interface 구성

저수지 물수지 모듈은 저수지 수위-내용적 곡선을 이용하여 저수지의 수위 변화에 따른 저수량을 산정하는 Interface로 구성되어있다. 저수지 내용적 곡선을 그래프로 나타내는 Interface (KB_d_rcuv), Tank 모형으로 분석한 유역유입량, 증발산량 식으로 산정한 일별 공급량, 강우량으로 물수지를 분석하는 Interface (KB_L_lgc), 저수지 물수지 곡선과 물수지 분석 결과를 그래프로 나타내는 Interface (KB_p_wbg1, KB_p_wbal)로 구분된다 (그림 3-7-8).

농업용수 공급량 모듈은 영농기에 논으로 공급되는 관개량 (IR)과 수로손실 및 배분 관리용수량 (또는 용수로 배수량)을 고려하여 관개효율(Ep)으로부터 산정된다. 증발산량 식에 필요한 작물계수를 입력하는 Interface (KP_d_Ccc), 증발산량 식으로 일별 공급량을 분석하는 Interface (KP_L_lgc), Penman식 계산결과로 산정한 일별 공급량, 생육기 수요량, 필요수량을 도시화하는 Interface (KP_p_wavg, KP_p_wreq, KP_p_wav1, KP_p_wre1)로 구분된다 (그림 3-7-9).



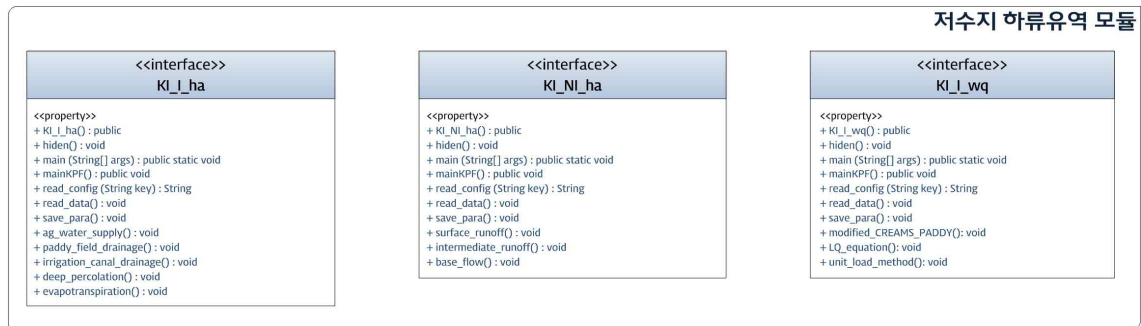
(그림 3-7-8) 저수지 물수지 Interface 구성



(그림 3-7-9) 농업용수 공급량 Interface 구성

저수지 하류유역 모듈은 저수지 하류 관개지구와 비관개지구의 수문순환을 해석하는

Interface (KI_I_ha, KI_NI_ha), 저수지 하류 는 포장의 수질을 모의하는 Interface (KI_I_wq)로 구분된다 (그림 3-7-10).



(그림 3-7-10) 저수지 하류유역 Interface 구성

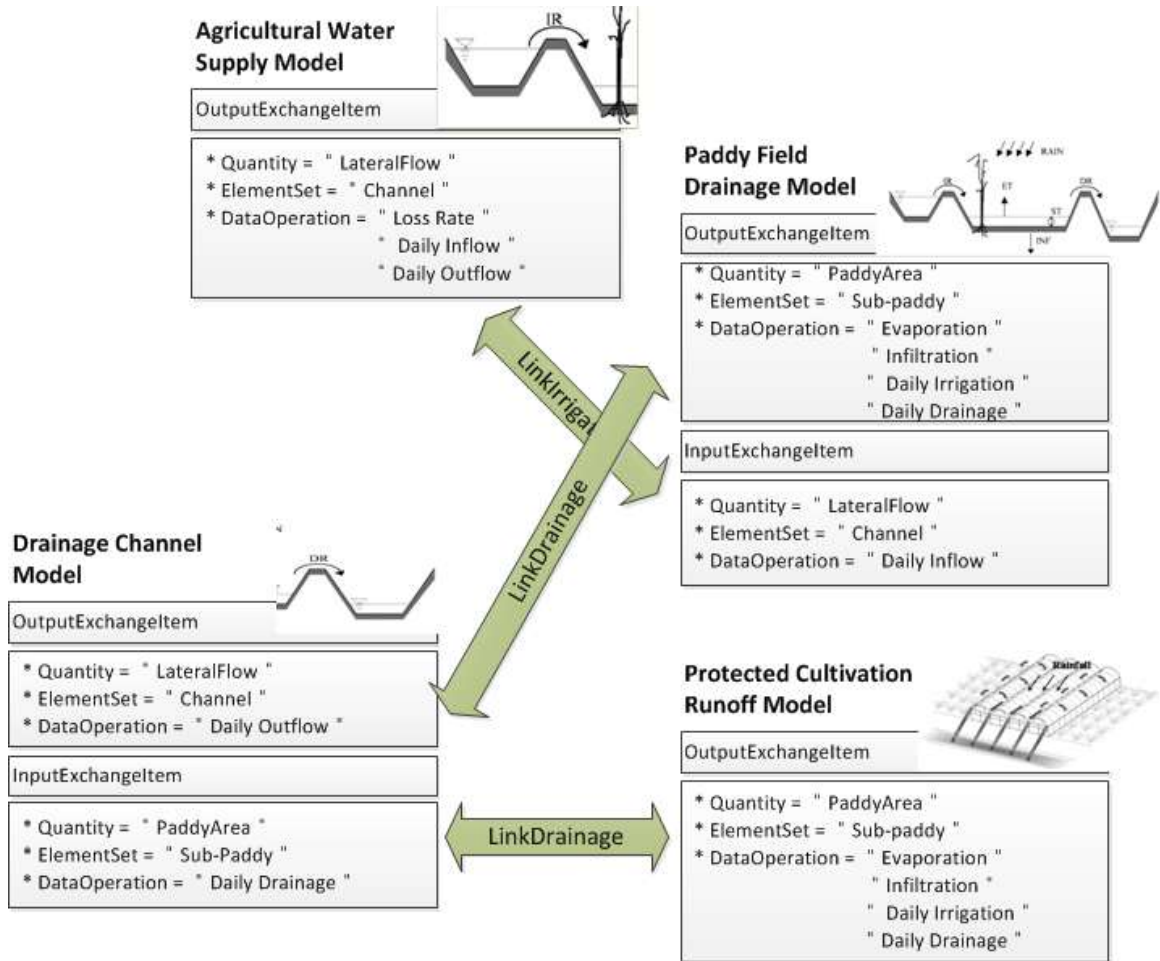
3. COMFARM 컴포넌트 구성/개발

3.1. COMFARM 컴포넌트 구성

COMFARM은 농촌용수 물순환 해석과 관련된 요소 기술 컴포넌트를 조합하여 사용자에 따른 맞춤형 모형을 구성하는 Framework를 제공한다. 이러한 기존 모형의 관리 는 Legacy Module Manager와 Configuration Manager에서 담당한다. 이러한 기능 설명을 위해 ‘Rainfall-runoff model’, ‘Reservoir water balance model’, ‘Agricultural water supply model’, ‘Drainage from irrigation districts model’, ‘Runoff from downstream watershed model’을 대상으로 기술하면 다음과 같다. 여기서 ‘Rainfall-runoff model’은 Tank 모형과 매개변수 추정 회귀식으로 구성되어 있는 저수지 상류유역 유출량을 모형이고, ‘Agricultural water supply model’은 농업용수 공급량을 모의하는 모형이고, ‘Reservoir water balance model’은 저수지 운영규칙을 고려하여 저수지 물수지를 모의하는 모형이고, ‘Drainage from irrigation districts model’와 ‘Runoff from downstream watershed model’은 관개지구의 배수량을 추정하고 저수지 하류 (관개지구 + 비관개지구)에서의 하천 유출량을 추정하는 모형이다.

(그림 3-7-11)은 5개의 모형의 연관관계를 표현한 Use-Case 다이어그램으로 ‘Rainfall-runoff model’은 저수지 상류유역과 저수지 하류유역 중 비관개지구의 유출량 및 침투량을 모의하는 모형으로 유출량 성분은 ‘Reservoir water balance model’과 ‘Runoff from downstream watershed model’으로 각각 전달하고, 침투량 성분은 ‘Runoff from downstream watershed model’으로 전달한다. ‘Agricultural water supply model’은 관개지구로 공급되는 농업용수 공급량을 모의하고, 농업용수 공급량을 ‘Reservoir water balance model’과 ‘Drainage from irrigation districts model’으로 전달한다. ‘Reservoir water balance model’은 저수지 물수지식을 통해서 저수량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량을 모의하고 제한수위 방류량과 만수위 방류량과 환경용수 방류량을 ‘Runoff from downstream watershed model’으로 전달한다. ‘Drainage from irrigation districts model’은 관개지구의 증발산, 침투, 송수손실, 용수로배수량, 포장 배수량 등의 기작을 통해 관개지구 침투량, 송수 손실량, 용수로

배수량과 포장 배수량을 'Runoff from downstream watershed model'으로 전달한다. 'Runoff from downstream watershed model'에서는 앞서 전달받은 하류 비관개지구 유출량, 용수로 배수량, 포장 배수량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경용수 방류량, 송수손실량, 상류 침투량을 모형의 내부 기작 (하도추적과 지하 유출)을 통해 하류 총 유출량으로 변환한다.



(그림 3-7-11) Use-Case 다이어그램

3.2. COMFARM 컴포넌트 계층 관리

COMFARM은 사용자가 전처리/주 객체 처리/후처리와 관련된 여러 컴포넌트를 조합하여 이용 목적에 따라 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하는 Framework이다. 본 연구에서는 [제 3 장 제 1, 2, 3절]에서 개발한 농촌용수 물순환 해석 요소기술, [제 3 장 제 8 절]에서 개발한 자료 관리 및 표준화시스템 (AWR-DMS, AWR-DMT), 제 3 장 제 4 절에서 개발한 매개변수 최적화 모듈, 그리고 그래프 및 표 생성 모듈 등을 각각의 컴포넌트로 구성하였다.

COMFARM은 컴포넌트 기반으로 개발되었기 때문에 컴포넌트 간 연관관계를 정의할 필요가 있다. (그림 3-7-12)는 COMFARM에서의 컴포넌트 간 관계를 보여주고 있다. 모형 구축 플랫폼에서는 (그림 3-7-12)에서 지정된 컴포넌트 간 관계만을 연결할 수 있

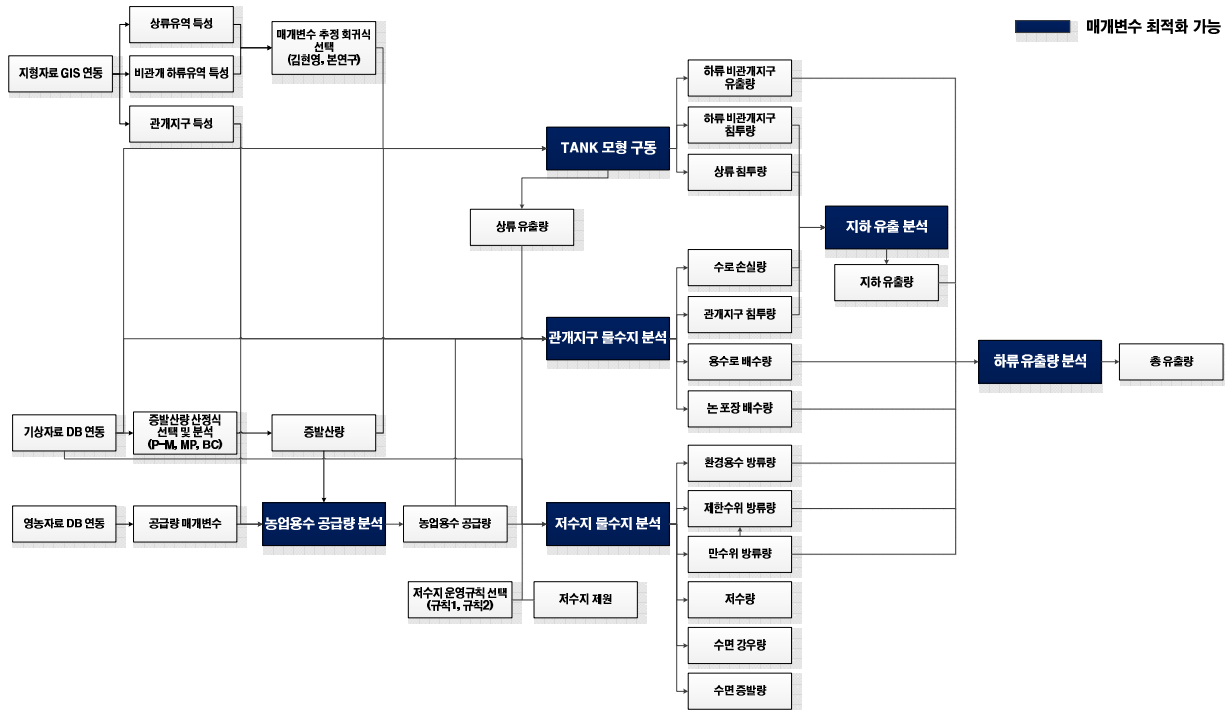
다. (그림 3-7-12)에서 지정되지 않은 컴포넌트 간의 관계는 연결할 수 없도록 구성되어 있다. 예를 들어, 「Tank 모형 구동」 컴포넌트는 「매개변수 추정 회귀식 선택」 컴포넌트와 연결할 수 있으나, Tank 모형과 관계없는 「공급량 매개변수」 컴포넌트와는 연결이 되지 않는다.

(그림 3-7-12) 형태의 컴포넌트 구성은 컴포넌트 간 데이터의 연관성을 정확히 표현하는데 장점이 있지만, 시스템 관리자 혹은 사용자가 전체 시스템을 이해하고 분석하는데 어려움이 있다. 따라서 컴포넌트 간의 계층관계를 두고 각 계층에서 컴포넌트 간의 연관관계를 구성하고 별도의 결과파일을 정의 한 후 상위 레벨에서 그룹화된 컴포넌트를 다시 연관관계를 구성하는 2단 계층 그룹화가 필요하다. (그림 3-7-13)은 이상의 그림을 2단 계층으로 그룹화하여 표현한 것이다.

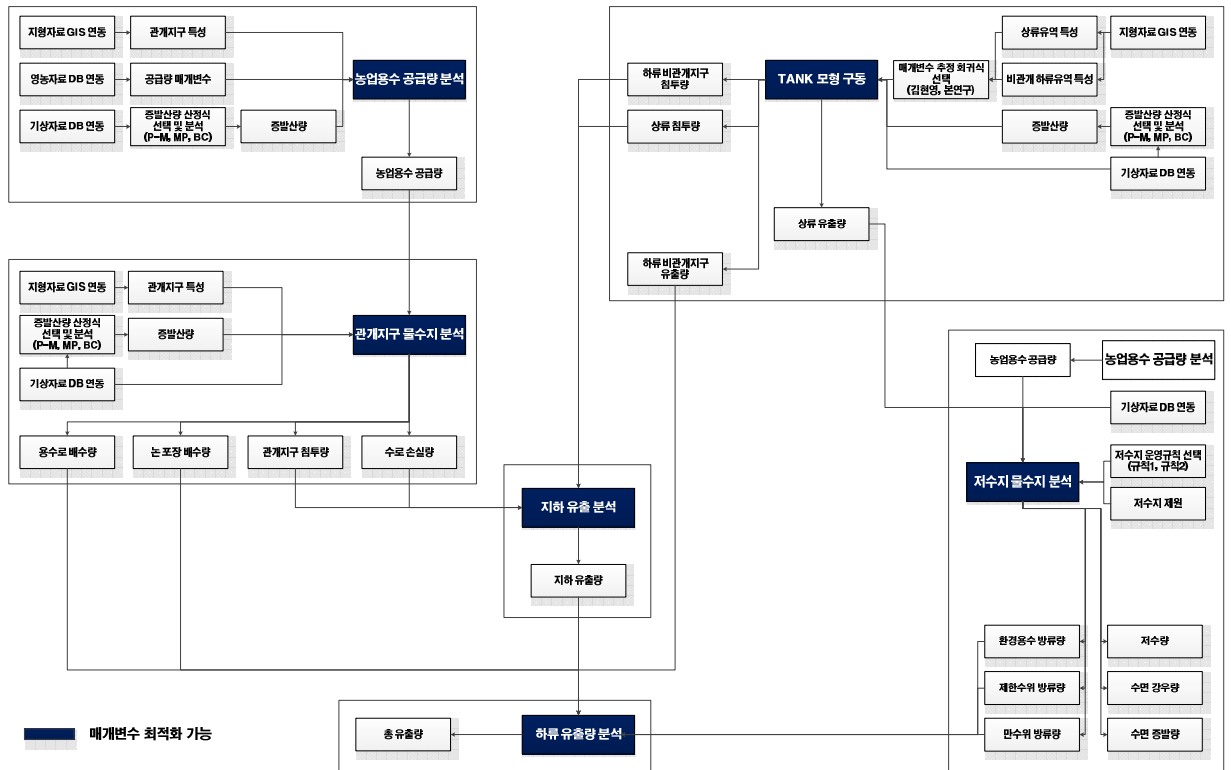
세부 컴포넌트를 주요 기능별로 분류하면 다음과 같다. 「지형자료 GIS 연동」, 「기상자료 DB 연동」, 「영농자료 DB 연동」 컴포넌트는 전처리와 관련된 컴포넌트로 자료 관리 및 표준화 시스템과 연동되어 맞춤형 모형 구축을 위한 기상, 지형, 영농자료를 손쉽게 구축할 수 있다. 「Tank 모형 구동」 컴포넌트는 「기상자료 DB 연동」, 「매개변수 추정 회귀식 선택」, 「증발산량」 컴포넌트를 입력받아 「상류 유출량」/ 「상류 침투량」 또는 「하류 비관개지구 유출량」/ 「하류 비관개지구 침투량」 컴포넌트를 출력한다. 「농업용수 공급량 분석」 컴포넌트는 「증발산량」, 「관개지구 특성」, 「공급량 매개변수」 컴포넌트를 입력받아 「농업용수 공급량」 컴포넌트를 출력한다. 「저수지 물수지 분석」 컴포넌트는 「기상자료 DB 연동」, 「상류유출량」, 「농업용수 공급량」, 「저수지 운영규칙 선택」, 「저수지 제원」 컴포넌트를 입력받아 「저수량」, 「수면 강우량」, 「수면 증발량」, 「제한수위 방류량」, 「만수위 방류량」, 「환경용수 방류량」 컴포넌트를 출력한다. 「관개지구 물수지 분석」 컴포넌트는 「기상자료 DB 연동」, 「영농자료 DB 연동」, 「관개지구 특성」, 「농업용수 공급량」, 「증발산량」 컴포넌트를 입력받아 「용수로 배수량」, 「논 포장 배수량」, 「관개지구 침투량」, 「수로 손실량」 컴포넌트를 출력한다. 「하천 유출량 분석」 컴포넌트는 「하류 비관개지구 유출량」, 「제한수위 방류량」, 「만수위 방류량」, 「환경용수 방류량」, 「논 포장 배수량」, 「용수로 배수량」, 「지하 유출량」 컴포넌트를 입력받아 「총 유출량」 컴포넌트를 출력한다. 만약 사용자가 모의 요소에 대한 실측 자료를 보유하고 있는 경우 「Tank 모형 구동」, 「농업용수 공급량 분석」, 「저수지 물수지 분석」, 「관개지구 물수지 분석」, 「지하 유출 분석」, 「하류 유출량 분석」의 컴포넌트는 「매개변수 최적화」 컴포넌트와 연동할 수 있다. 모든 컴포넌트는 「그래프」 및 「표」 컴포넌트와 연결하여 출력할 수 있다.

COMFARM에서 기본 환경으로 제공하는 컴포넌트는 본 연구의 연구자가 선정한 농촌용수 물순환 주요 기법을 위주로 정립된 것이다. 따라서 이상의 컴포넌트 또한 ‘개발자에 의한 맞춤형 모형’이라 표현할 수도 있다. 사용자에게 따라서는 개발자가 제공하는 기본 컴포넌트를 수정하거나 일부 컴포넌트는 삭제 후 다른 컴포넌트로 대체하고자 할 수도 있다. 이를 위해 COMFARM에서는 각각의 컴포넌트를 구성하는 요소를 수정할 수 있도록 설계서를 제공한다. (그림 3-7-14) - (그림 3-7-16)은 [제 3 장 제 1, 2, 3절]의 농촌용수 물순환 해석을 위한 주요 해석기법을 위주로 정립된 것으로 기

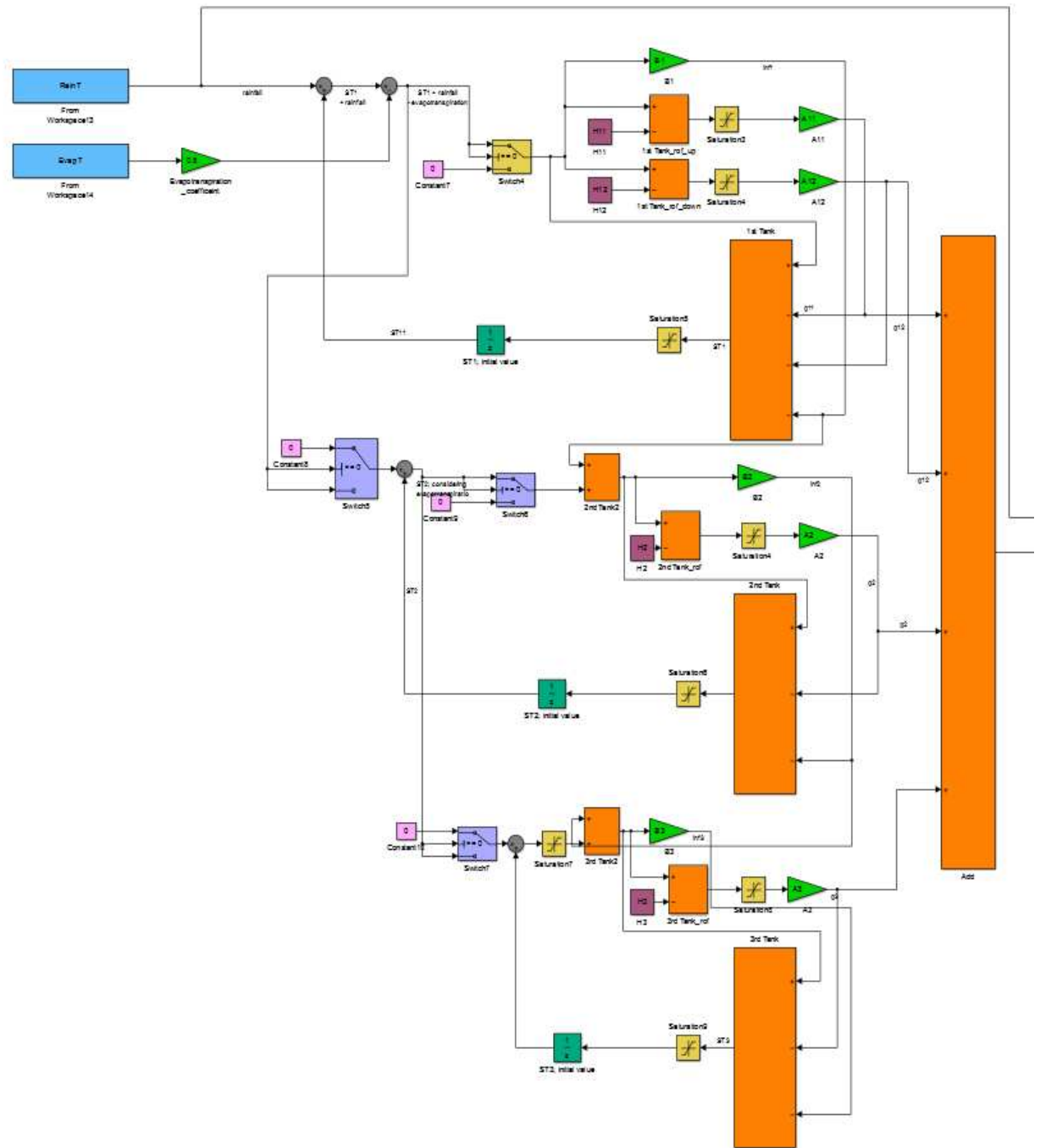
작에 대한 자세한 설명은 각 장을 참조하기를 바란다.



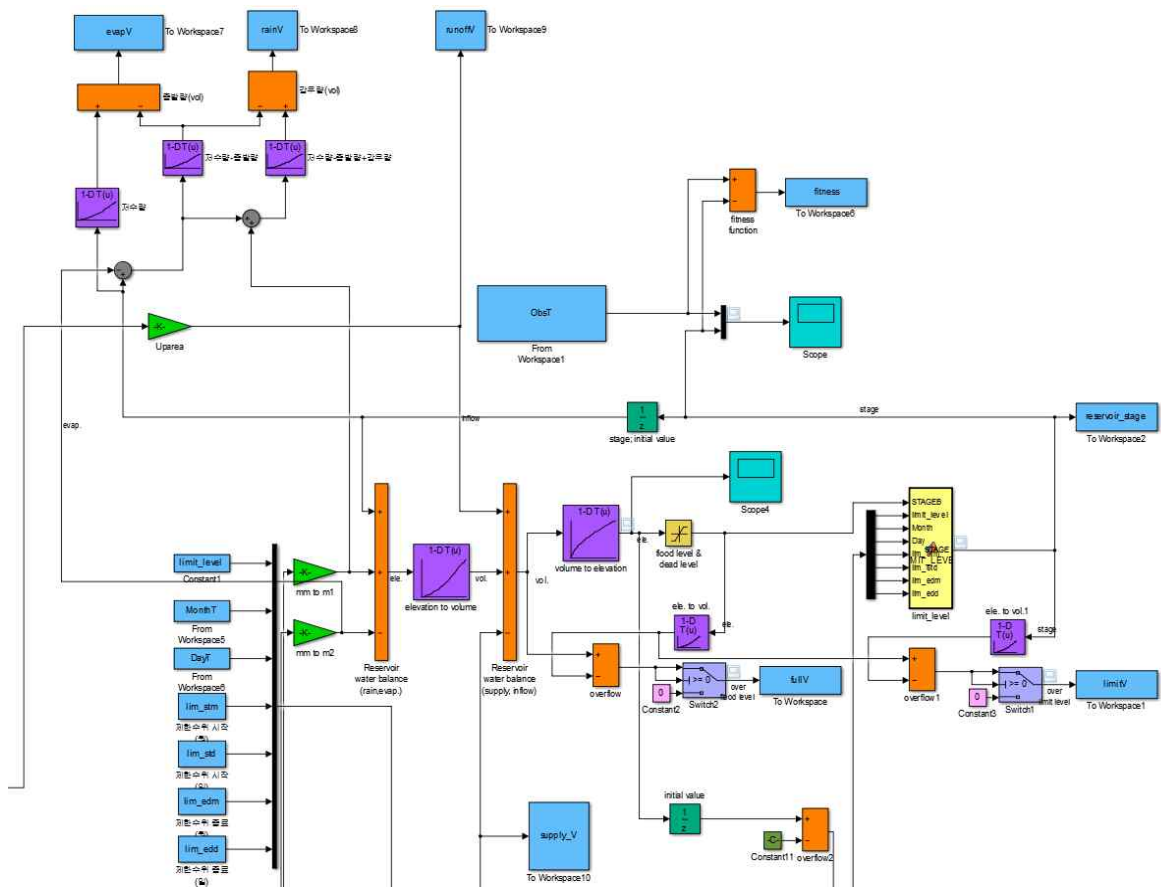
(그림 3-7-12) 세부 컴포넌트의 연관관계



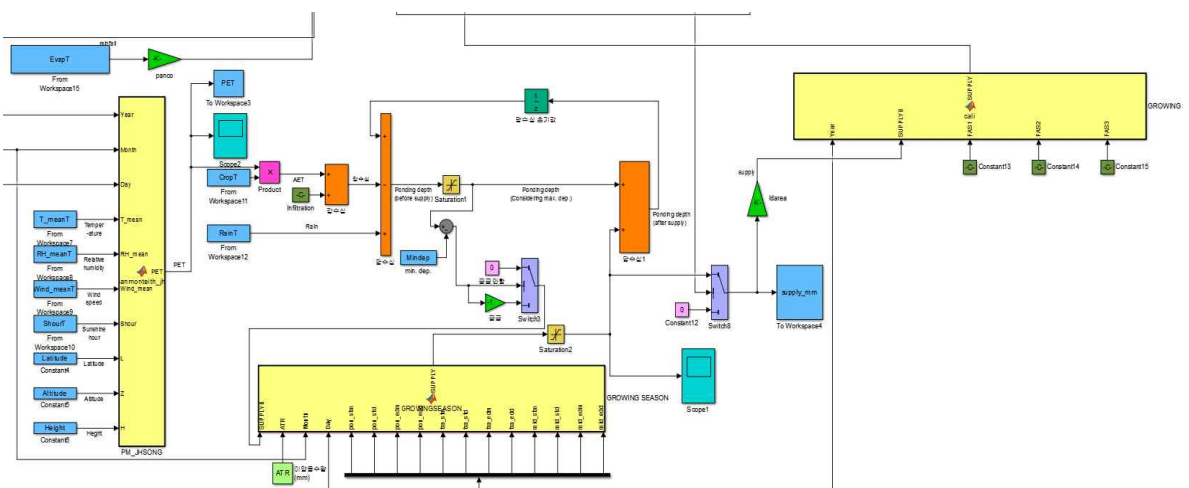
(그림 3-7-13) 2단 계층 그룹화



(그림 3-7-14) 수정 3단 Tank 모형 설계서



(그림 3-7-15) 저수지 물수지 모형 설계서



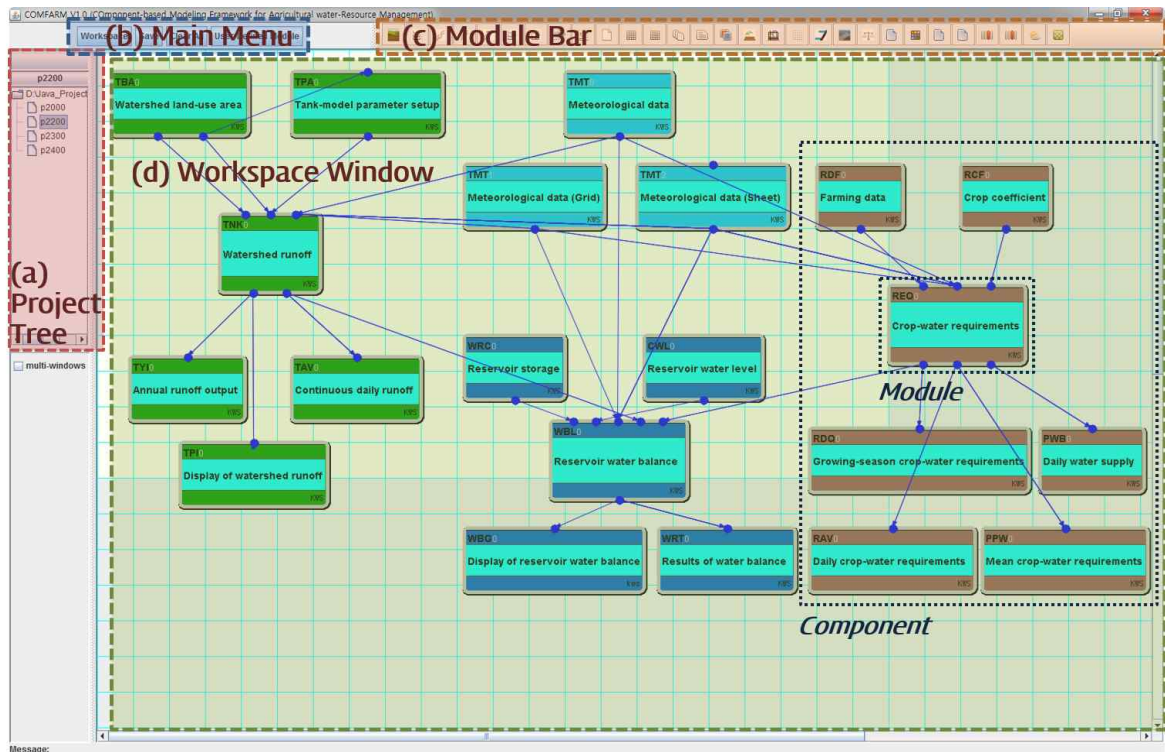
(그림 3-7-16) 농업용수 공급량 모형 설계서

4. COMFARM을 이용한 농업유역 모델링

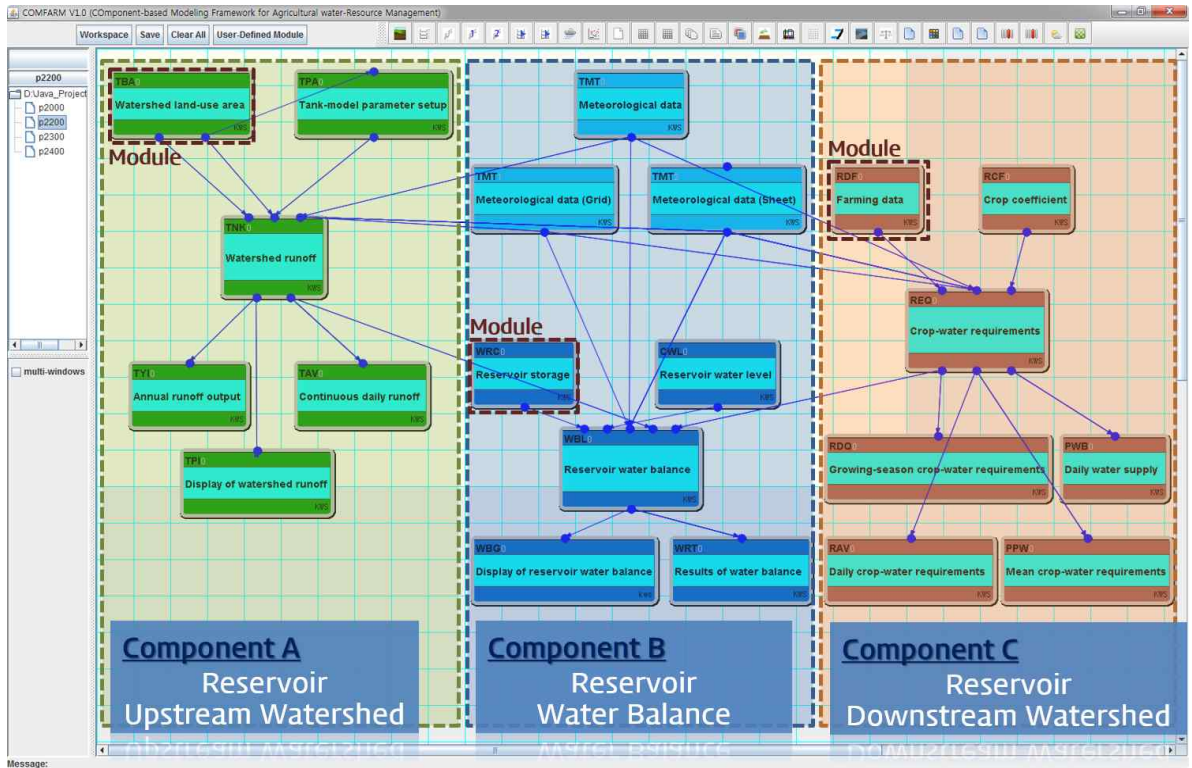
COMFARM 상의 각각의 컴포넌트는 요소 모듈 객체의 조합으로 구성되며, 사용자는 이러한 컴포넌트를 조합함으로써 맞춤형 모델링 시스템을 개발할 수 있다. COMFARM을 이용한 농업유역 모델링 시스템의 개발 과정 및 그 적용 결과는 (그림 3-7-17) - (그림 3-7-21)에서와 같다. 사용자는 자료 관리 및 표준화 모듈과 연동하여 입력 자료 (기상, 지형, 영농자료) 구축을 위한 전처리 과정을 수행할 수 있다. 모의 모듈은 저수지 상류유역, 저수지, 저수지 하류 유역과 같이 공간적 범위에 따라 구분되어 분류되어 있으며, 모의 모듈들을 조합하여 저수지 유입량, 농업용수 공급량, 만수위 방류량, 제한수위 방류량, 관개지구 배수량, 하류유역 유출량, 저수지 수질, 그리고 관개지구 배출부하량 등을 모의할 수 있다. 또한, 구축한 맞춤형 모형에 대해 매개변수 최적화 과정을 수행할 수 있으며 표, 그림 및 보고서를 출력하는 후처리 과정을 수행할 수 있다.

(그림 3-7-17)은 농업유역 물순환 모델링 시스템의 개발을 위해 COMFARM에서 제공되는 프레임워크의 일반적인 구성 요소를 보여주고 있다. 프레임워크의 구성요소는 프로젝트 트리, 주메뉴, 모듈 아이콘, 작업창 등이며, 각각의 주요 기능은 매뉴얼에 상세히 설명되어 있다.

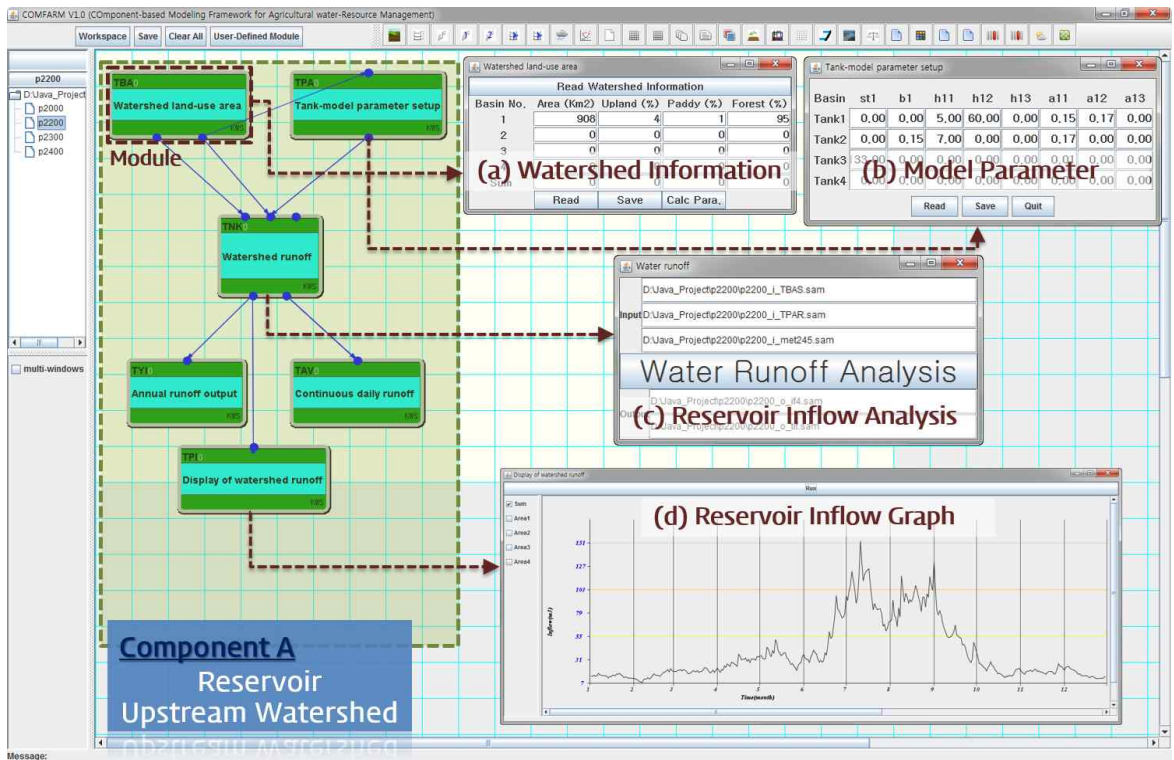
(그림 3-7-18)은 COMFARM 상에서 개발된 컴포넌트 기반의 농업유역 물순환 모델링 시스템을 보여주고 있다. 또한, (그림 3-7-19)는 개발된 농업유역 물순환 모델링 시스템의 모의 결과인 유출량을 표와 그림의 형식으로 나타내고 있다.



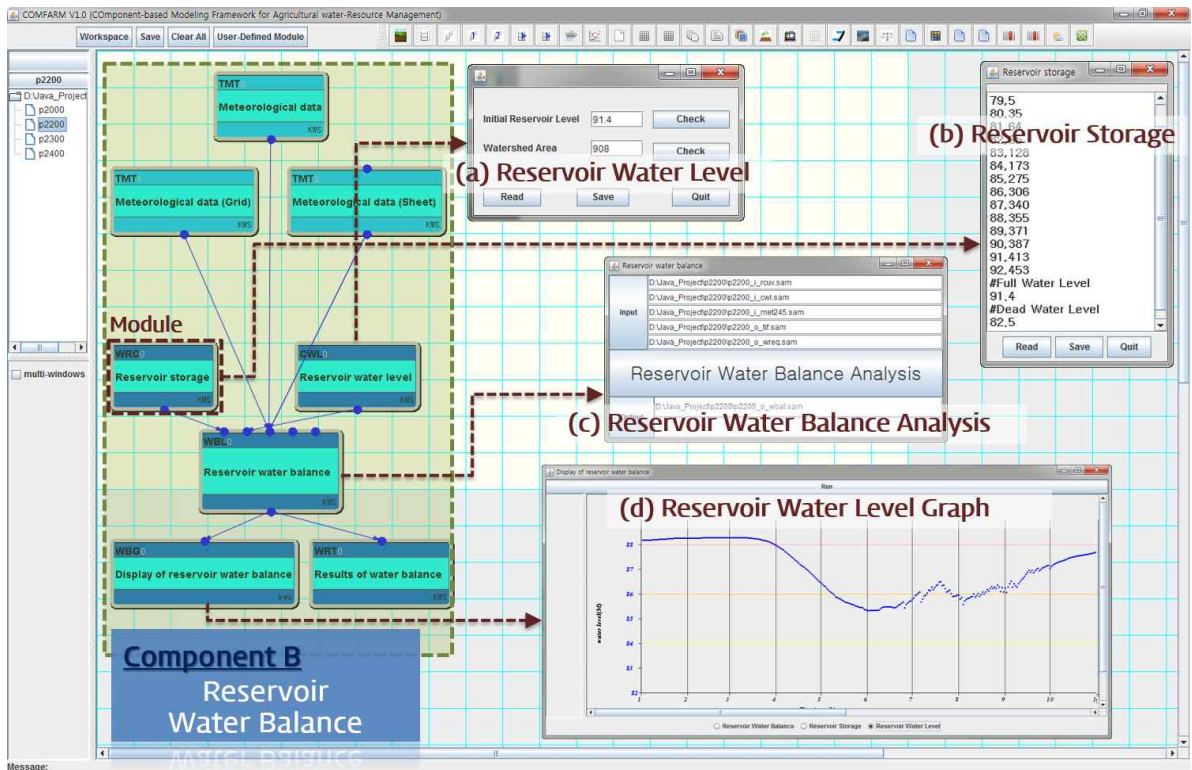
(그림 3-7-17) COMFARM 프로그램의 (a) Project Tree, (b) Main Menu, (c) Module Bar, 그리고 (d) Workspace Window.



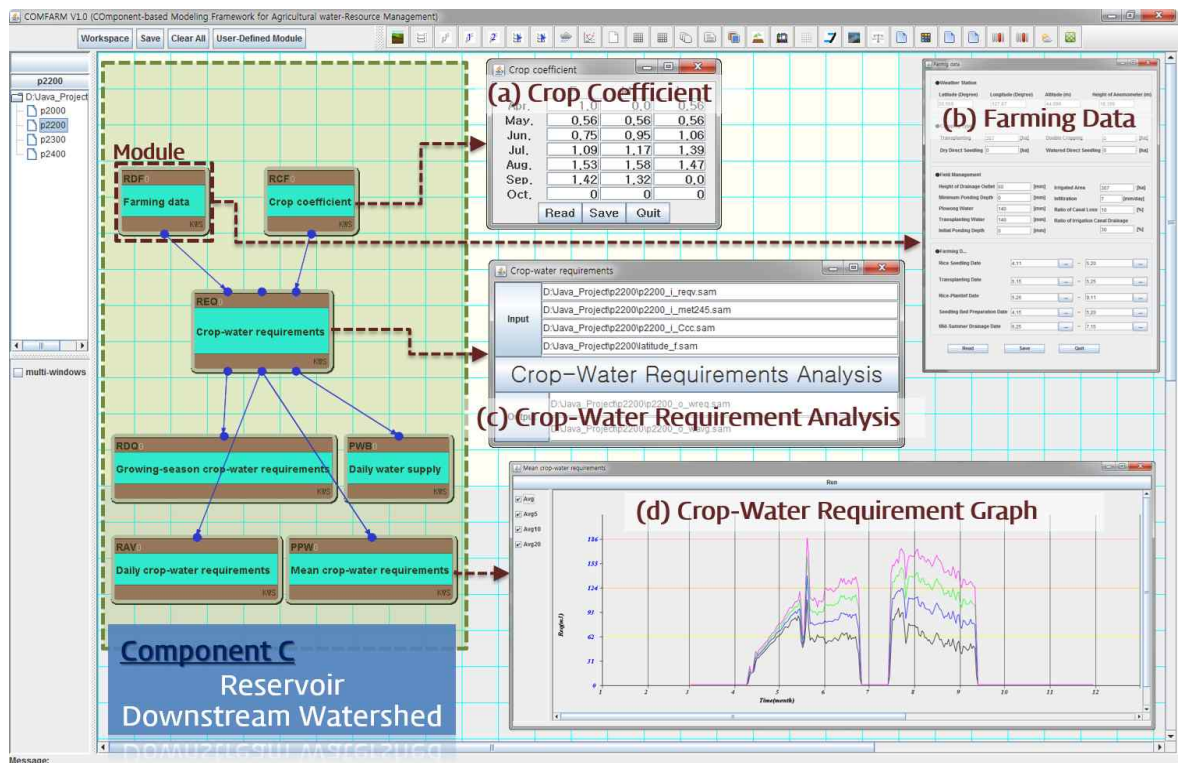
(그림 3-7-18) COMFARM 기반 객체 모듈 및 물순환 해석 응용



(그림 3-7-19) 저수지 상류유역 해석 컴포넌트



(그림 3-7-20) 저수지 물수지 해석 컴포넌트



(그림 3-7-21) 저수지 하류 관개지구 컴포넌트

5. 요약 및 결론

본 장에서는 농촌용수 물순환을 해석하기 위해 Framework를 연계한 기술인 COMFARM을 개발하였다. COMFARM의 개발을 위해서 OpenMI Framework의 개요 및 구조 등 시스템 개발에 필요한 설계내용에 대해 조사하였으며, 그 내용을 바탕으로 컴포넌트 기반 COMFARM Framework를 개발하였다. 본 장에서의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① OpenMI Framework의 구조 및 개발 과정을 고찰하여, 농촌용수 물순환 모형을 개발하는데 있어 적용성을 검토하였다.
- ② Framework를 기반으로 한 농촌용수 물순환 모형을 개발하기 위한 절차, Architecture, Interface 등을 설명하였고, 특히 COMFARM에서 정의하는 다양한 Interface에 대해 구체적인 예를 들어 설명하였다.
- ③ 맞춤형 모형을 제공하는 COMFARM의 컴포넌트의 구성과 컴포넌트 간의 계층 관리 방법을 제안하였다. 여러 모듈을 통합하는 경우 발생할 수 있는 복잡성을 개선하기 위해 그룹화를 통한 시스템의 단순화와 계층화된 모듈 구성 방법을 제시하였다.

본 연구에서 개발한 컴포넌트 기반 COMFARM Framework는 농촌용수 물순환을 맞춤형 모형으로 구성하여 종합적으로 해석할 수 있는 시스템을 제공할 수 있을 것이라 사료된다.

제 8 절 농촌용수종합정보 자료 관리 및 표준화 시스템 개발

1. 서 론

Sensor 및 정보 기술의 발전은 국가적으로 수문모니터링망의 구축을 통한 강우, 하천유량 등 다양한 수문 인자에 대한 실시간 측정이 가능하도록 하였다. 또한, 위성 영상 및 GIS 소프트웨어 기술은 공간적으로 분포하는 다양하고 방대한 정보를 사용 목적에 맞게 관리하는데 매우 편리하게 이용되고 있다. 현재까지, 실시간 자료와 공간적인 측정망을 연계하여 관련 유용한 정보를 온라인으로 사용자에게 제공하는 다양한 종합정보시스템이 개발되어 왔으나, 오히려 각 부처별로 필요에 따라 정보시스템을 개발함에 따라 중복이 많은 정도로 광범위한 정보의 홍수를 이루고 있는 실정이다.

자료 관리에 대한 연구는 대부분 각 분야에 대해 국한되어 자료의 품질 관리 및 자료 변환에 초점을 맞추어 이루어졌다. 자료 품질 관리 기준을 적용해서 자료의 정도를 높이거나 알고리즘 등의 수학적 기법을 적용해 이상치를 보정하는 방법에 대해 중점적으로 수행되었다. 채정훈 등 (2014)은 시계열 및 통계 분석을 이용하여 복합기상 센서의 특성을 고려한 기상자료의 품질관리시스템 (Quality Control system for Integrated Meteorological Sensor data, QCIMS)을 개발한 바 있다. 김억기 등 (2012)은 우리나라 강수지역을 구분하기 4가지 자료 전처리 기법을 적용하여 군집분석을 수행하였다. 군집분석을 수행하기 전에 사용한 4가지 자료 전처리 기법으로는 일반 정규화 방법, 수정된 정규화 방법, Z-score 방법, 요인분석을 사용하였고, 군집분석은 K-means 방법을 선택하여 분석하였다. Kang et al. (2008)은 경제적이고 환경적인 계분관리를 위해 영양물질 관리 계획 수립, 이송 분석, 자료 관리 등의 기능을 제공하는 GIS 기반 PLDSS (Poultry Litter Decision Support System)를 개발하였다. 권효정 등 (2007)은 미기상학적/통계학적 분석에 근거한 에디 공분산 자료의 품질 관리 및 보정 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다. Carleton et al. (2005)은 유역의 수문 및 수질 모니터링 자료 관리 및 분석을 위해 데이터베이스를 구축하여 방대한 자료 관리의 적용성을 보여주었다.

자료 전처리에 대한 연구도 일부 수행된 바 있으나 기존의 구축된 데이터베이스의 자료를 단순히 변환 또는 보정하는 정도에 그치거나 농촌유역을 대상으로 수행된 연구가 많지 않아 농촌유역의 물순환 해석에 적용하기에는 적합하지가 않다. 임익현과 배성환 (2015)은 U.S. EPA에서 제공하는 대기확산모델을 활용하기 위해 국내 기상 자료를 모형에 맞게 변환하고 입력 자료 구축이 가능한 기상자료 전처리 프로그램을 개발한 바 있으며, 조명희 등 (2013)은 체계적인 자료 관리 및 활용을 위해 프로그램에 구축된 하천조사자료의 현황을 조회하는 기능, 하천측량 원시자료를 기반으로 한 하천 DEM 및 단면도 제공 기능, 두 개의 단면을 비교·분석하여 단면변화의 증가량 및 감소량을 산출하는 기능을 개발하였다. Joo et al. (2000)은 인공신경망을 이용하여 수질 자료의 이상치를 보정하는 전처리 기법을 개발하였다.

농촌유역을 대상으로 수행한 연구들의 내용을 살펴보면 자료 품질 관리 정도에 머무르는 경우가 많고 소유역에 한정되어있어 광범위한 농촌유역을 대상으로 적용하기에는 한계가 있으며, 물순환 해석에 초점을 맞춘 연구는 많지 않은 실정이다. 박지훈 등

(2013)은 농업비점오염 저감을 위해 소유역 단위의 대상유역에서 수집한 모니터링 자료를 데이터베이스를 구축하고, 이를 기반으로 자료를 효율적으로 관리하고 도시화하는 농업비점 자료 관리 시스템 (Agricultural NPS-Data Management System, ANPS-DMS)을 개발한 바 있으며, 김학관 등 (2006)은 유역 수문자료의 효과적인 관리 및 활용을 위해 수문 자료 관리 시스템 (Hydrologic Data Management System, HDMS)을 개발하였다. HDMS는 자료의 검색, 관리, 기술통계를 제공하여 수문자료의 정확성과 품질을 제고한다. 강문성 등 (2001a, 2001b)은 소유역의 건전한 수계환경 보전 방안을 제시하기 위한 수계환경 관리 및 평가시스템 (Watershed Environment Management and Evaluation Systems, WEMES)을 개발하였다. WEMES는 소유역의 수계환경을 계량화하여 평가하고 이로부터 도출된 결과를 이용하여 사용자의 의사결정을 지원한다.

농촌용수 물 순환의 종합해석을 위해서는 다양한 시·공간 정보의 이용이 불가피하고, 따라서 물 순환 해석에 요구되는 자료를 데이터베이스로 구축하고, 수집한 방대한 자료를 체계적으로 관리하고 효율적으로 이용하기 위한 자료 관리 시스템 (Agricultural Water Resources-Data Management System, AWR-DMS)을 개발하고, 구축한 데이터베이스를 물순환 모형에 적합한 입력 자료를 제공하는 웹기반 자료 표준화 시스템 (Web-Based Data processing and Model linkage Techniques for Agricultural Water-Resource management, AWR-DMT)을 개발하는 것이 필요하다. 특히 기존의 구축된 다양한 국가정보시스템으로부터 필요한 자료를 실시간으로 획득하고 이로부터 물 순환 해석 모형에 요구되는 자료를 모형이 요구하는 형태로 가공하여 제공하는 기술은 농촌용수의 종합관리를 위해 필수적이다.

시간 자료는 강수량, 일사량, 기온, 지온 등 일정 시간단위로 측정되는 시계열자료로써 기상자료가 대표적이라 할 수 있고, 이에 하천 유량 등 측정망을 통한 실시간 측정자료도 포함된다. 기상자료는 수문모형 구동뿐만 아니라, 증발산량 산정의 기초자료이다. 이러한 자료는 농촌용수 모형에 적용되기 위해서는 적절한 시간 스케일로 적절한 형식에 맞게 가공되어야 한다. 또한 이러한 시간 자료는 빈도해석을 통한 설계 강우 또는 설계 홍수량 산정에도 이용될 수 있다.

공간 자료는 일반적으로 수치표고모형 (DEM), 하천도, 토지이용도, 토지피복도, 토양도, 지형도 등 일정한 공간적인 해상도에 대해 특성치를 가지는 형태로 구축된다. 이러한 공간 자료는 유역의 경계를 결정하고, 또한 수문 모형의 입력자료 내지는 입력인자의 계수값 산정의 기본 자료가 된다. 즉, DEM, 하천도 등은 유역의 특성인자인 유역면적, 유로장, 하천경사, 형상계수 등의 추출에 이용될 수 있고, 토양, 토지피복도 등은 유역 유출량 산정을 위한 지수 선정에, 토양 특성도는 강우에 의한 토양침식인자 계산에 이용되어 진다.

본 장에서는 수문해석과 향후 수질해석기법 모델링을 위하여, ① 모니터링 자료 및 실시간 자료 데이터베이스 구축 기법, ② GIS 자료 기반 수문·수질계수 추출 기법, ③ 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발, ④ 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 개발 등으로 구성되며, 다양한 시·공간 정보를 농촌용수 해석에 효과적으로 이용 가능하도록 데이터베이스를 구축하여 자료의 품질을 관리하고 효과적으로 도시화하는 자

료 관리 시스템과 물순환 모형의 입력 자료와 설계 홍수량 등의 산정을 위한 입력 자료를 생성하는 표준화 기법을 정립하여 제공하는 자료 표준화 시스템을 개발하였다.

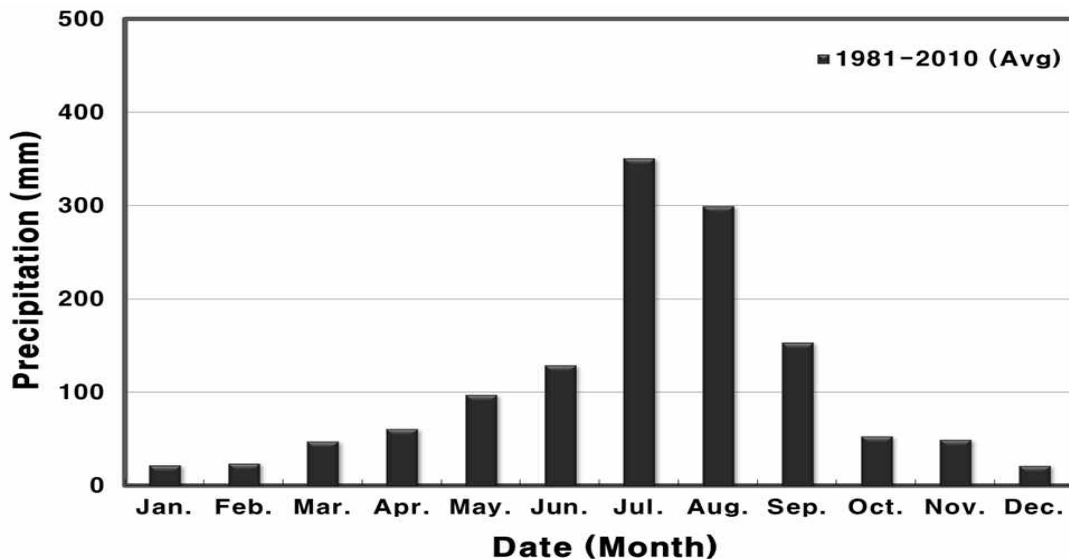
2. 농촌용수종합정보 데이터베이스 구축

2.1. 기상자료

추후 모형의 입력 자료로 활용하기 위해 기상자료 DB (Database)를 구축하였다. 전국에 분포한 기상관측소의 시간별/일별 기상자료를 수집하였으며, 이동저수지와 거리상 가장 가까운 수원 기상관측소의 30년 월별 평균 (1981년 - 2010년) 강수량, 기온, 풍속, 상대 습도, 일사량을 예시로 나타내었다.

가. 강수량

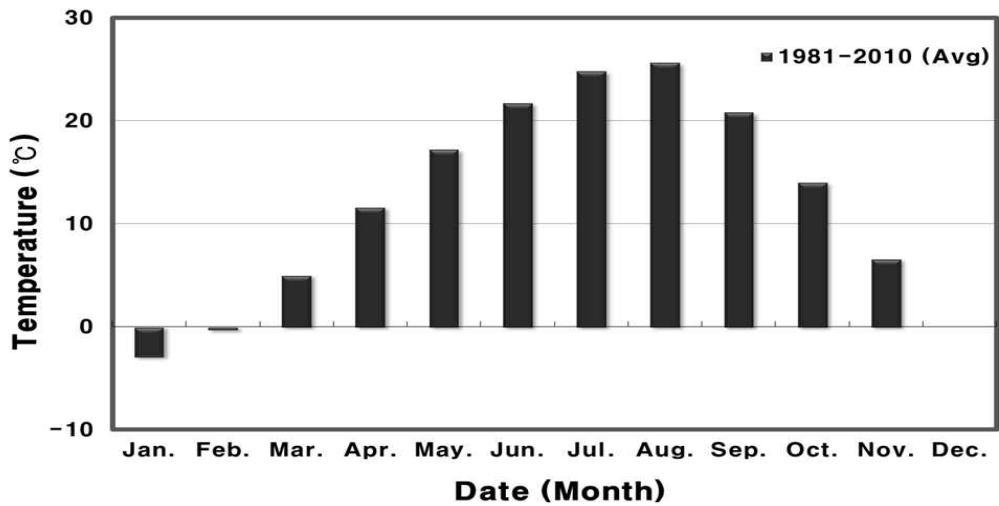
수원 기상관측소의 30년 월별 평균 강수량을 (그림 3-8-1)에 나타내었다. 연 평균 강수량은 1312.2 mm로 나타났으며, (그림 3-8-1)에서 확인할 수 있듯이 장마가 발생하는 여름철 (7월 - 8월)에 많은 강수량을 기록하는 것으로 나타났다. 7월에는 가장 많은 351.1 mm의 강수량이 기록되었고, 8월에는 두 번째로 많은 299.8 mm의 강수량이 기록되었다. 반면 12월에는 가장 적은 21.8 mm의 값을 나타냈고, 1월에는 두 번째로 적은 22.4 mm의 값을 나타냈다.



(그림 3-8-1) 수원 기상관측소 월별 평균 강수량 (1981-2010)

나. 기온

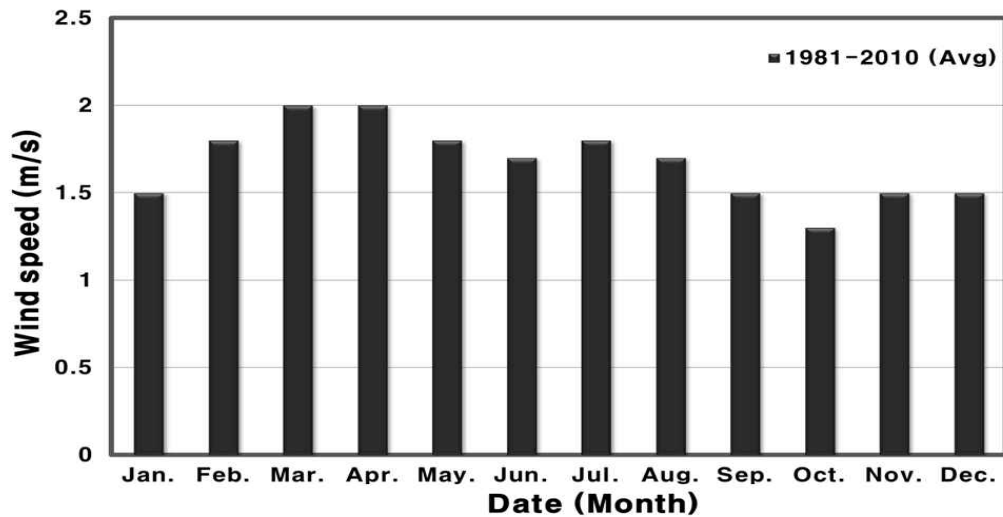
수원 기상관측소의 30년 월별 평균 기온을 (그림 3-8-2)에 나타내었다. 30년간 평균기온은 12.0 °C로 나타났으며 강수량과 마찬가지로 여름철에 높은 값을, 겨울철에 낮은 값을 나타냈다. 평균 기온은 8월에 가장 높은 25.6 °C, 7월에는 두 번째로 높은 24.8 °C의 값을 나타냈다. 반면 1월에는 가장 낮은 -2.9 °C, 2월에는 두 번째로 낮은 -0.3 °C의 값을 나타냈다.



(그림 3-8-2) 수원 기상관측소 월별 평균 기온 (1981-2010)

다. 풍속

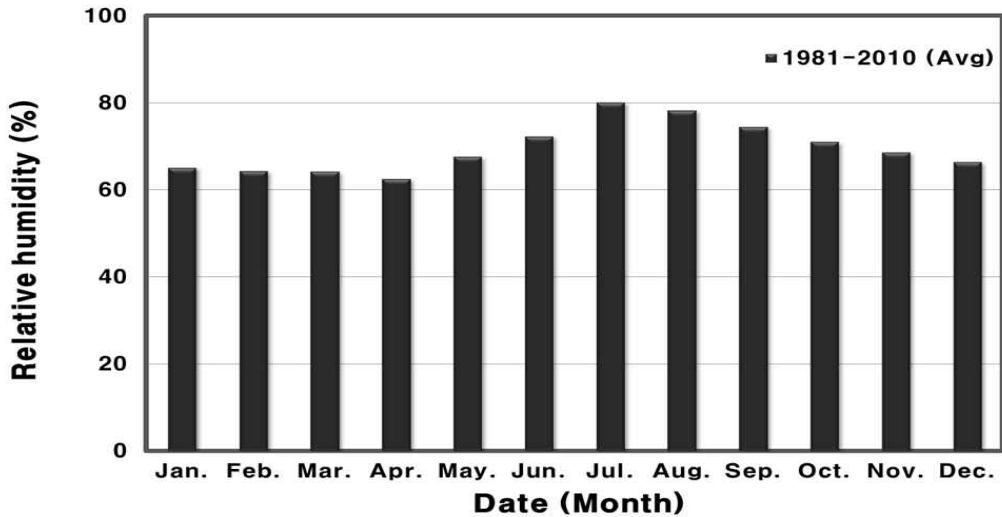
수원 기상관측소의 30년 월별 평균 풍속을 (그림 3-8-3)에 나타내었다. 월별 평균 풍속은 1.3 m/s - 2.0 m/s의 값을 나타내었다.



(그림 3-8-3) 수원 기상관측소 월별 평균 풍속 (1981-2010)

라. 상대 습도

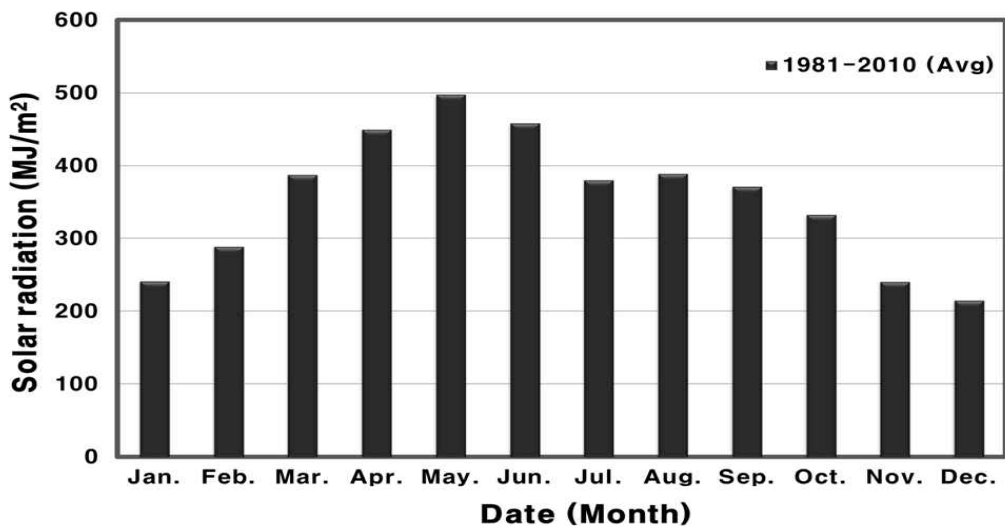
수원 기상관측소의 30년 월별 평균 상대 습도를 (그림 3-8-4)에 나타내었다. 월별 평균 상대 습도는 62.5 % - 80.1 %의 값을 나타내었고, 장마가 발생하는 7월 - 8월에 높은 값을 기록하였다. 7월에 가장 높은 80.1 %의 값을, 4월에 가장 낮은 62.5 %의 값을 기록하였다.



(그림 3-8-4) 수원 기상관측소 월별 평균 상대 습도 (1981-2010)

마. 일사량

수원 기상관측소의 30년 월별 일사량의 평균값을 (그림 3-8-5)에 나타내었다. 월별 일사량의 평균값은 $215.1 MJ/m^2$ - $497.4 MJ/m^2$ 의 값을 나타내었고, 5월에 가장 높은 값을, 12월에 가장 낮은 값을 기록하였다.



(그림 3-8-5) 수원 기상관측소 월별 평균 태양 복사량 (1981-2010)

2.2. 지형자료

가. 자료 구분

GIS 자료는 지형·공간 자료, 특성 자료, 영상 자료, 속성 자료 등으로 구분된다. 이중 지형자료는 각종 지도로서 정의되는 공간적 특성을 표시하는 것으로, 그 위치가 불변하는 기본적 자료로부터 생성되는 기본도와 이를 바탕으로 특정한 속성을 표시하는 주제를 나타내는 주제도로 구분하는 것이 보통이다. 기본도의 예로서는 지형도, 하천

도 등이 있으며, 주제도의 예로는 토양도, 유역도, 수문학적 토양군도 등이 있다. 각 주제도의 구분에 따라 그 특성을 나타내는 매개 변수와 성질 등의 자료를 속성자료라고 하는데, 그밖에 매개변수의 특성을 표시하여 특성자료라고 하여 일반적인 속성자료와 구분하기도 한다.

나. 자료 수집

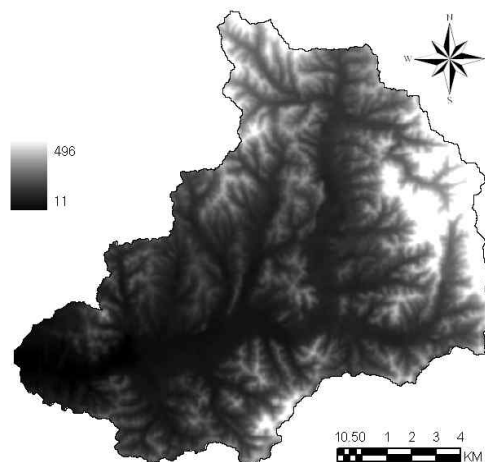
수문·수질 계수를 추출에 필요한 각종 GIS 자료들을 수집하였다. 자료 수집을 위해 국토해양부 국가지리정보포털 (NGIS), 국가 수자원관리종합정보시스템 (WAMIS), 환경부 환경공간정보서비스 등을 이용하였으며, 토양도, 토지피복도, 하천도, 경사분석도 등의 자료를 수집하였다. 국가 수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 일부 자료는 Arc/Info의 교환 포맷인 .e00으로 제공되고 있다. .e00 포맷 파일은 Arc/Info를 이용해 GRID 파일로 변환하는 작업을 수행하여야 ArcGIS 상에서 활용이 가능하며, 현재는 ArcView 혹은 ArcCatalog 상에서 GUI를 이용하여 변환을 수행할 수 있다.

다. 자료 구축

GIS 자료 구축의 예로 경기도 용인시에 위치한 이동저수지 상·하류 유역을 대상으로 ArcGIS Desktop 9.3.1을 이용하여 각종 지형자료를 작성하였다. 구축된 GIS 자료는 수치표고모델 (DEM), 수계망도, 토지피복도 (대분류, 중분류), 개략토양도, 정밀토양도, 수문학적 토양군도, 경사분석도, 음영기복도, 향분석도 등으로 DB화하여 향후 수문·수질 계수 추출에 이용될 수 있도록 하였다.

(1) 수치표고모델 (DEM)

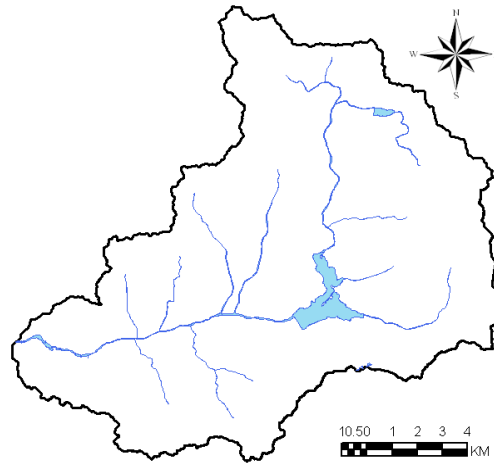
수치표고모델 (Digital Elevation Map, DEM) 자료를 구축하기 위하여 1/25,000 국가 지리정보포털 (NGIS) 수치지도를 이용하였다. 수치지도로부터 등고선을 분리하여 등고선도를 구축하고, 이로부터 해상도가 30 m인 DEM 자료를 구축하였다. (그림 3-8-6)은 이동저수지 유역의 DEM을 나타내고 있다.



(그림 3-8-6) 이동저수지 유역 DEM

(2) 수계망도

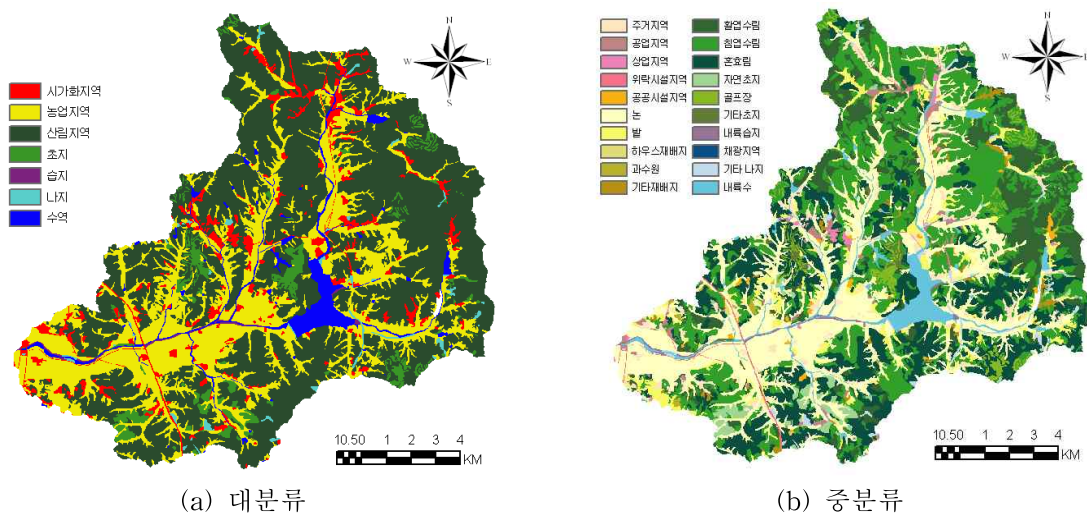
수계망도 구축을 위해 국가 수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 하천차수도, 국가하천도, 지방1급하천도, 지방2급하천도 등을 이용하였다. 수집된 하천도를 각각 이동저수지 유역에 대하여 분리한 후 통합하여 하나의 수계망도를 구축하였다 (그림 3-8-7).



(그림 3-8-7) 이동저수지 유역 수계망도

(3) 토지이용도

환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 대분류 및 중분류 토지피복지도를 이용해 이동저수지 유역에 대하여 대분류 및 중분류 토지이용도를 작성하였다. 대분류 토지피복지도는 토지이용을 7가지로, 중분류 토지피복지도는 토지이용을 23가지로 분류하고 있으며 그 내용은 <표 3-8-1>과 같다. 이동저수지 유역의 토지이용도 작성 결과는 (그림 3-8-8)과 같다.



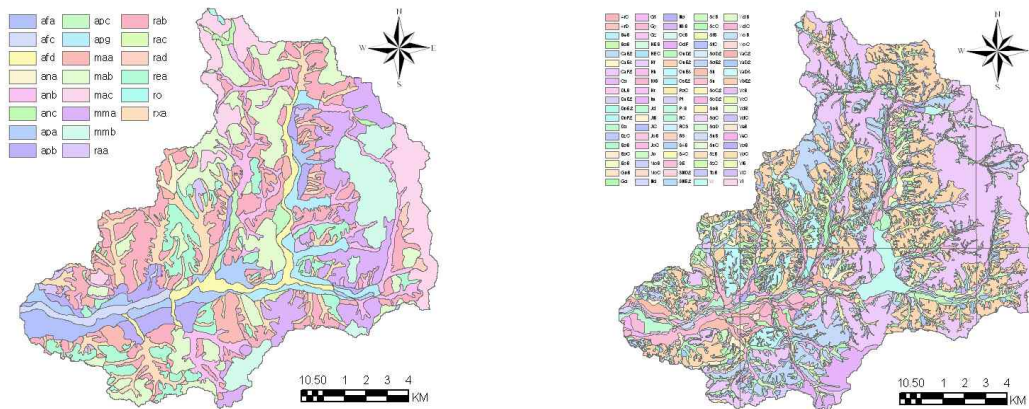
(그림 3-8-8) 이동저수지 유역 토지이용도

<표 3-8-1> 대분류/중분류 토지피복지도 토지이용 및 분류코드

대분류 (7항목)		중분류 (23항목)	
토지이용	분류코드	토지이용	분류코드
시가화/건조지역	100	주거지역	110
		공업지역	120
		상업지역	130
		위락시설지역	140
		교통지역	150
		공공시설지역	160
농업지역	200	논	210
		밭	220
		하우스재배지	230
		과수원	240
		기타재배지	250
산림지역	300	활엽수림	310
		침엽수림	320
		혼효림	330
초지	400	자연초지	410
		골프장	420
		기타초지	430
습지	500	내륙습지	510
		연안습지	520
나지	600	채광지역	610
		기타 나지	620
수역	700	내륙수	710
		해양수	720

(4) 토양도

토양도는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 작성하였다. 벡터로 작성된 폴리곤 (polygon)에 각각의 토양을 구분하여 토양통명, 토성, 토층수 및 그에 해당하는 토심, 비중, 유기물 함유벡터로 작성된 폴리곤에 각각의 토양을 구분하여 토양통명, 토성, 토층수 및 그에 해당하는 토심, 비중, 유기물 함유율, 그리고 점토, 실트, 극세사, 모래 및 자갈 함유율 등을 속성으로 입력하였다. (그림 3-8-9)는 이동저수지 구역의 개략토양도 및 정밀토양도를 나타내고 있다.



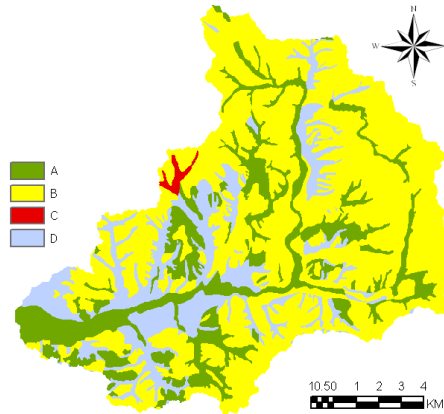
(a) 개략토양도

(b) 정밀토양도

(그림 3-8-9) 이동저수지 구역 토양도

(5) 수문학적 토양군도

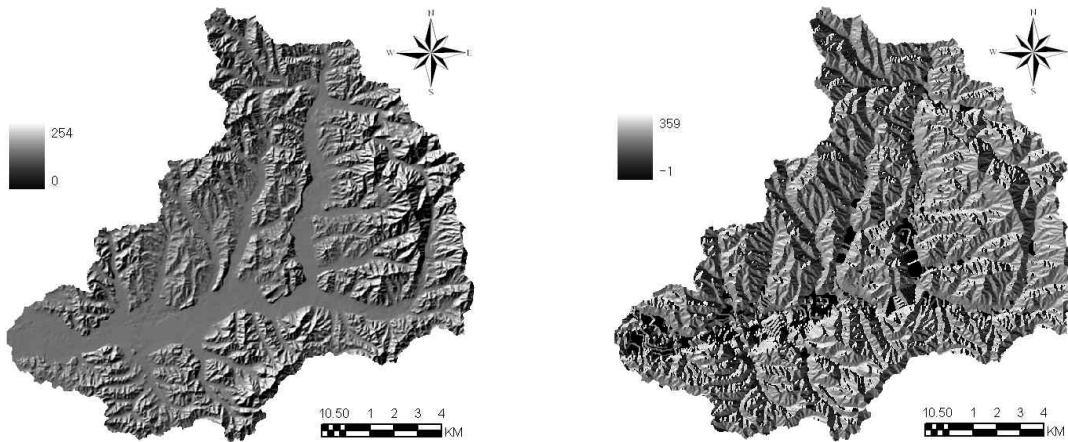
구축된 토양도를 기반으로 수문학적 토양군도를 작성하였다. 수문학적 토양군은 토양의 배수 특성에 따라 A, B, C, D 4가지로 구분되며, (그림 3-8-10)과 같다.



(그림 3-8-10) 이동저수지 유역 수문학적 토양군도

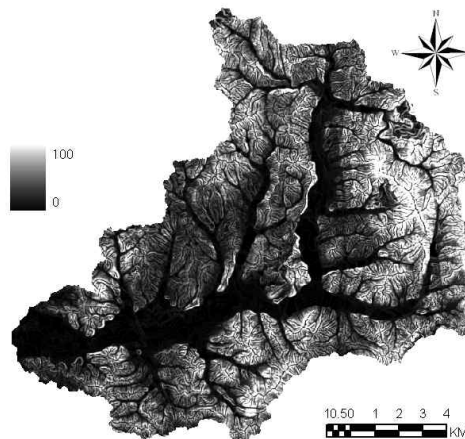
(6) 음영기복도, 향분석도, 경사분석도

수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 제공하는 음영기복도, 향분석도, 경사분석도를 수집하였으며 (그림 3-8-11)에 나타내었다.



(a) 음영기복도

(b) 향분석도



(c) 경사분석도

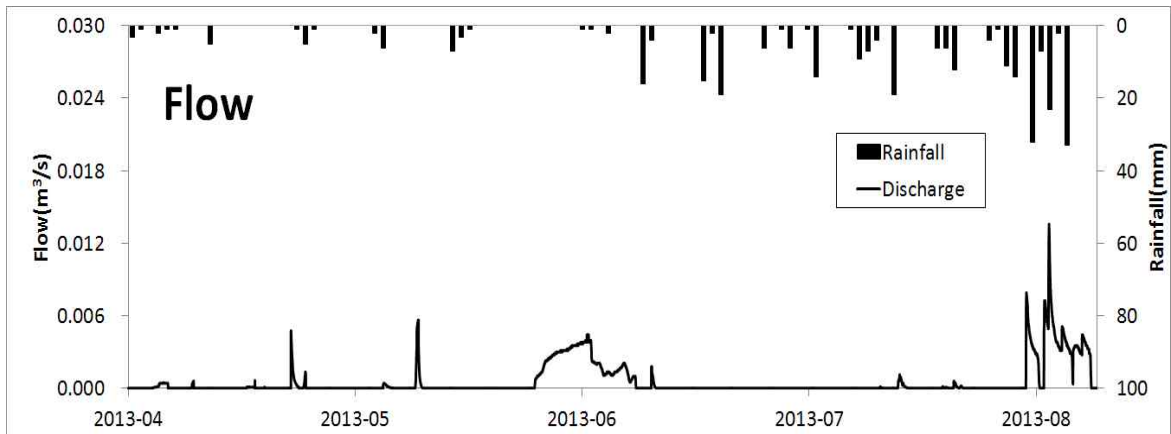
(그림 3-8-11) 이동저수지 유역 음영기복도, 향분석도, 경사분석도

2.3. 수문자료

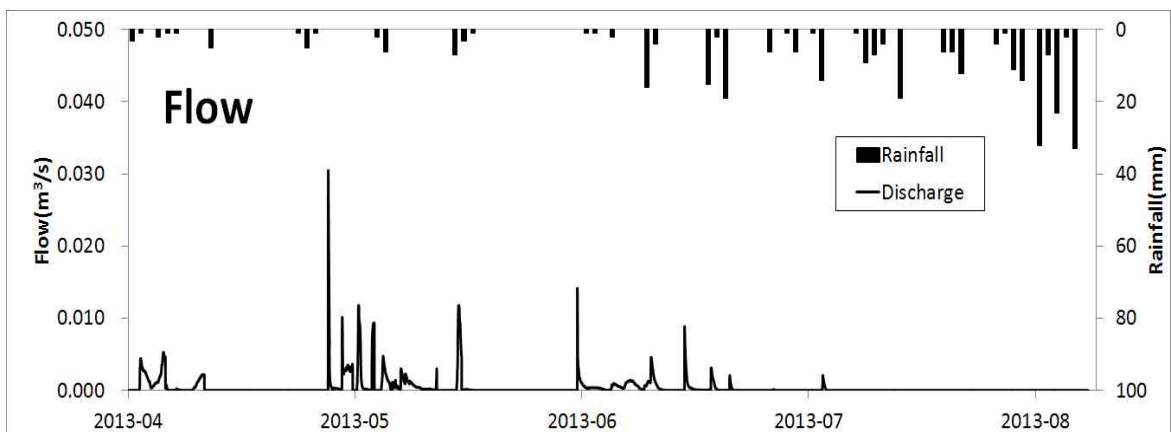
추후 모형의 입력 자료로 활용하기 위해 수문자료 DB를 구축하였다. 수문자료의 대상유역으로 남한강 하류유역 내에 위치하는 청미천 상류유역과 근삼리 유역을 선정하였다. 소유역 단위의 정기 모니터링과 집중 모니터링을 실시하기 위해 모니터링 장비를 광역 및 포장단위로 구분하여 설치한 후 수문자료를 수집하였다. 포장단위 모니터링과 유역단위 모니터링을 실시하여 지점별 수득한 유량자료를 예시로 나타내었다.

가. 포장단위 모니터링

(그림 3-8-12)와 (그림 3-8-13)은 지점 NPD-#1과 NPD-#2의 유출량을 모니터링 결과를 보여주고 있다. 유출량은 각 지점에 부자식 수위계를 설치하여 얻은 수위자료를 바탕으로 플룸식을 이용하여 산정하였다. NPD-#1는 5월 초순, 5월 하순, 6월 초순, 7월 하순에서 8월 초순 등의 기간 동안 논 유출이 발생하였으며, NPD-#2는 4월 하순, 5월 중순, 6월 중순 등의 기간 동안 논 유출이 발생하였다.



(그림 3-8-12) NPD-#1 지점의 유량

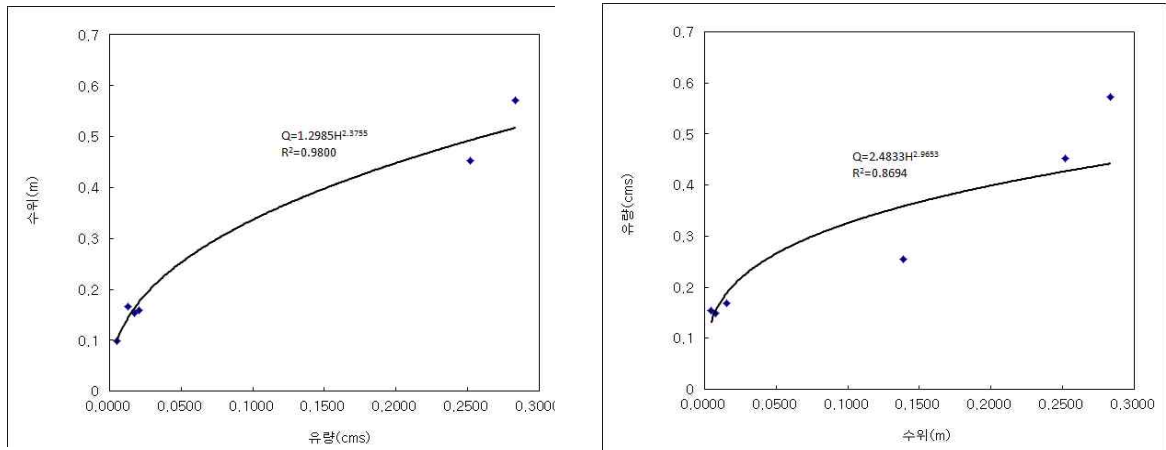


(그림 3-8-13) NPD-#2 지점의 유량

나. 유역단위 모니터링

(1) 수위-유량 관계곡선 산정

(그림 3-8-14)와 <표 3-8-2>는 NWS-#3, NWS-#4, NWS-#5 지점의 수위-유량 관계곡선 및 관계식 산정 결과를 나타내고 있다. NWS-#3과 NWS-#4는 각각 총 6회, NWS-#5는 총 4회의 모니터링을 수행하여 수위-유량 관계곡선을 산정하였다. 지점별로 산정된 수위-유량 공식을 이용하여 지점별 하천 모니터링 유량을 산정하였다.



(a) NWS-#3

(b) NWS-#4

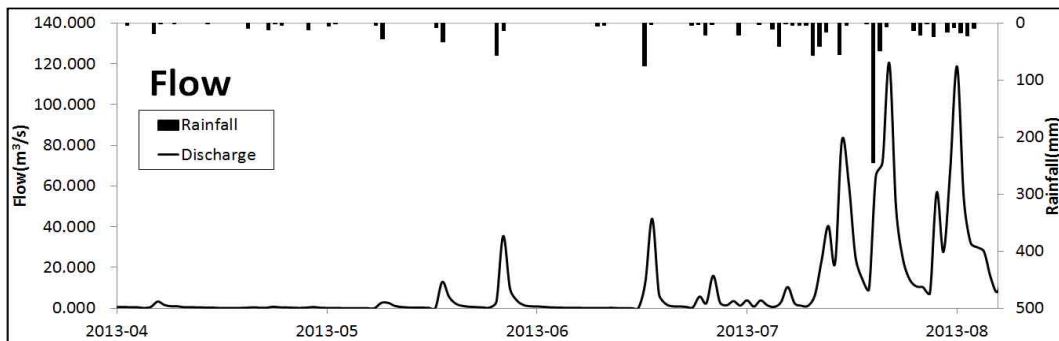
(그림 3-8-14) 지점별 수위-유량 관계곡선

<표 3-8-2> 지점별 수위-유량 관계식

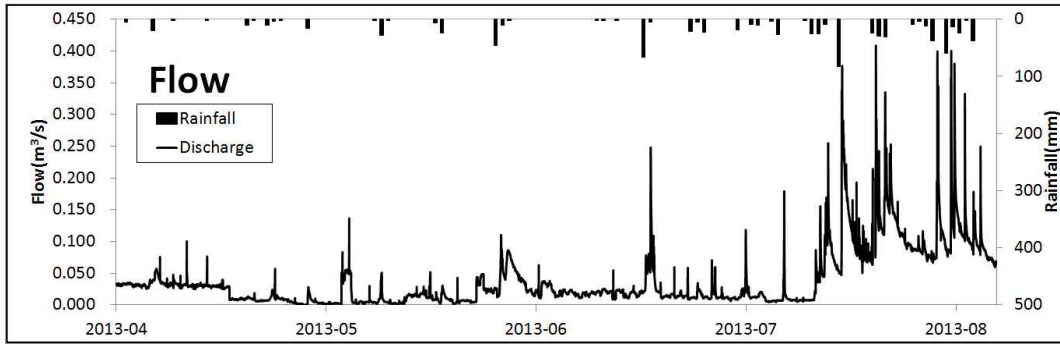
지점명	수위 H (m)-유량 Q (m ³ /s) 관계곡선식	R ²
NWS-#3	$Q = 1.2985H^{2.3756}$	0.9800
NWS-#4	$Q = 2.4833H^{2.9653}$	0.8694
NWS-#5	$Q = 0.1276H^{1.4729}$	0.8408

(2) 지점별 유량 산정

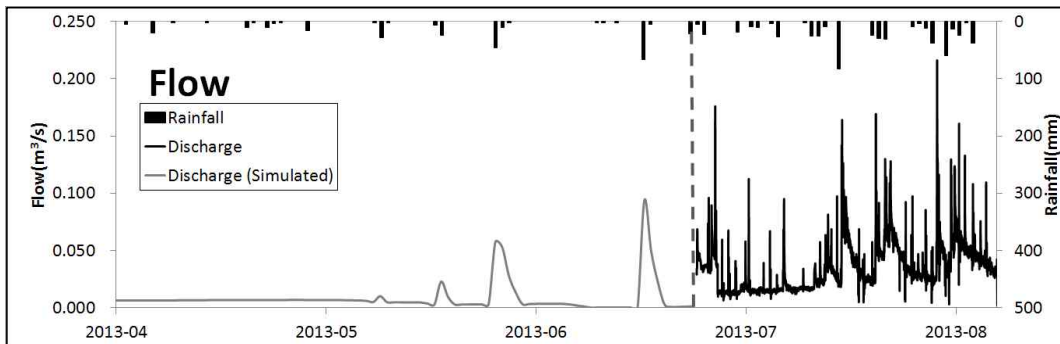
(그림 3-8-15) - (그림 3-8-18)은 지점 NWS-#1 - NWS-#5의 유량 모니터링 결과를 보여주고 있다. NWS-#1은 이천 강우관측소의 일별 강우자료와 국토교통부에서 관리하고 있는 청미 유량관측소의 유량 자료를 이용하였고, NWS-#2 - NWS-#5는 삼죽 강우관측소의 일별 강우자료와 각 지점에 설치된 초음파 수위계의 수위자료를 유량자료로 환산하여 나타내었다. NWS-#3, NWS-#5는 앞서 산정된 수위-유량 관계식을 이용하여 유량을 계산하였다.



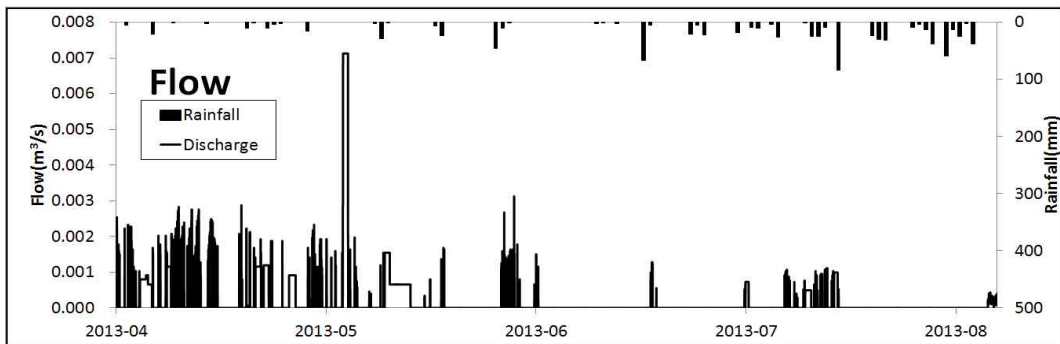
(그림 3-8-15) NWS-#1 지점의 유량



(그림 3-8-16) NWS-#3 지점의 유량



(그림 3-8-17) NWS-#4 지점의 유량



(그림 3-8-18) NWS-#5 지점의 유량

2.4. 수질자료

추후 모형의 입력 자료로 활용하기 위해 수질자료 DB를 구축하였다. 수질자료의 대상유역으로 남한강 하류유역 내에 위치하는 청미천 상류유역과 근삼리 유역을 선정하였다. 포장단위 모니터링과 유역단위 모니터링을 실시하여 지점별 수득한 수질자료를 예시로 나타내었다.

가. 포장단위 모니터링

지점 NPD-#1, NPD-#2에서 포장단위의 유기물질, 영양물질, 기타분석을 실시하였다. <표 3-8-3>과 <표 3-8-4>는 지점별 대표 유기물질 (BOD, COD_{Mn} 등), 영양물질

(T-N, NH₄-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P 등), 기타분석 (TSS 등)에 대한 월별 결과를 나타내고 있다.

유기물질 분석 결과를 살펴보면, BOD는 2.4 mg/L (NPD-#1) - 28.3 mg/L (NPD-#2)의 범위를, COD_{Mn}은 6.6 mg/L (NPD-#1) - 52.6 mg/L (NPD-#2)의 범위를 나타내며, BOD, COD_{Mn} 모두 대체로 비슷한 변화 경향을 보여주고 있다.

영양물질 분석 결과를 살펴보면, 질소계열 중 T-N은 2.522 mg/L (NPD-#1) - 8.973 mg/L (NPD-#2)의 범위를, NH₄-N은 0.075 mg/L (NPD-#1) - 1.706 mg/L (NPD-#1)의 범위를, NO₃-N은 0.054 mg/L (NPD-#1) - 5.972 mg/L (NPD-#2)의 범위를 나타낸다. 인계열 중 T-P는 0.133 mg/L (NPD-#1) - 2.293 mg/L (NPD-#2)의 범위를, PO₄-P는 0.050 mg/L (NPD-#1) - 0.352 mg/L (NPD-#2)의 범위를 가진다. T-N, T-P 모두 5월에 크게 증가한 뒤 6월에 감소하는 경향을 나타냈다. NPD-#1 포장의 7월, NPD-#2 포장의 5월에는 NH₄-N가 검출되지 않았다.

기타항목 분석 결과를 살펴보면, TSS는 16 mg/L (NPD-#1) - 588 mg/L (NPD-#2)의 범위를 나타낸다. TSS는 6월에 최솟값을 나타냈다.

<표 3-8-3> 포장단위 수질 모니터링 결과 (NPD-#1)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.04.17	6.9	NC	5.1	13.9	264	0.195	0.787	1.706	0.111	0.883	6.202
2013.05.01	6.5	NC	9.4	20.9	216	0.290	1.067	0.085	14.911	3.136	7.754
2013.06.11	7.1	9.0	NC	NC	16	NC	0.133	0.075	NC	0.054	2.522
2013.07.02	6.6	NC	2.4	6.6	510	0.050	0.408	ND	ND	1.911	2.741

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-4> 포장단위 수질 모니터링 결과 (NPD-#2)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.04.17	6.9	NC	5.5	14.0	86	0.077	0.284	0.208	ND	1.750	3.556
2013.05.01	6.5	NC	28.3	52.6	588	0.352	2.293	ND	0.060	5.972	8.973
2013.06.11	7.3	6.5	NC	NC	16	NC	0.506	0.215	NC	ND	3.841

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

나. 유역단위 모니터링

NWS-#1 - NWS-#7 지점에서 유역단위의 유기물질, 영양물질, 기타분석을 실시하였다. <표 3-8-5> - <표 3-8-11>은 지점별 대표 유기물질 (BOD, COD_{Mn} 등), 영양물질(T-N, NH₄-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P 등), 기타분석 (TSS 등)에 대해 월별 값을 나타내고 있다.

유기물질 분석 결과를 살펴보면, BOD는 0.3 mg/L (NWS-#6) - 5.1 mg/L

(NWS-#6)의 범위를, CODMn은 0.8 mg/L (NWS-#2) - 10.2 mg/L (NWS-#6)의 범위를 나타낸다. NWS-#2, NWS-#3, NWS-#6에서는 BOD, COD_{Mn} 모두 4월에 최댓값을 보인 후에 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, NWS-#4, NWS-#7은 큰 변동 없이 일정한 범위를 나타냈다.

영양물질 분석 결과를 살펴보면, 질소계열 중 T-N은 0.750 mg/L (NWS-#1) - 9.904 mg/L (NWS-#6)의 범위를, NH₄-N은 0.063 mg/L (NWS-#1) - 4.841 mg/L (NWS-#6)의 범위를, NO₃-N은 0.353 mg/L (NWS-#7) - 8.395 mg/L (NWS-#6)의 범위를 가진다. 인계열 중 T-P는 0.031 mg/L (NWS-#5) - 3.019 mg/L (NWS-#4)의 범위를, PO₄-P는 0.011 mg/L (NWS-#7) - 0.393 mg/L (NWS-#3)의 범위를 가진다. NWS-#1, NWS-#2 지점의 T-N은 4월에 최댓값을 나타낸 뒤 이후 점차 경향을 보였다. NWS-#1, NWS-#3, NWS-#4 지점의 T-P는 6월에 최댓값을 나타내었다. NWS-#2 지점의 4 - 7월, NWS-#3 지점의 5 - 7월, NWS-#4 지점의 4, 6, 7월, NWS-#5 지점의 3, 7월, NWS-#6 지점의 4, 5, 7월, NWS-#7 지점의 7월에는 NH₄-N가 검출되지 않았다. NWS-#5 지점의 7월에는 T-P가 검출되지 않았다. NWS-#1 지점의 7월, NWS-#5 지점의 7월에는 PO₄-P가 검출되지 않았다.

기타물질 분석 결과를 살펴보면, TSS는 2 mg/L (NWS-#4) - 180 mg/L (NWS-#3)의 범위를 가진다. NWS-#1, NWS-#2, NWS-#4, NWS-#6 지점의 TSS는 5 - 6월에 최대값을 나타내는 경향을 보였다. NWS-#2 지점의 7월, NWS-#3 지점의 6월, NWS-#4 지점의 7월, NWS-#5 지점의 7월, NWS-#6 지점의 7월, TSS가 검출되지 않았다.

<표 3-8-5> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#1)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.04.17	6.9	NC	3.1	6.6	21	0.066	0.118	0.610	0.438	2.113	3.737
2013.06.11	7.3	10.0	NC	NC	32	NC	0.138	0.063	NC	0.676	2.165
2013.07.10	7.1	NC	2.3	3.5	14	ND	NC	NC	ND	0.566	0.750

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-6> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#2)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	7.1	NC	0.8	1.6	9	NC	0.112	0.933	0.238	2.754	3.730
2013.04.17	6.8	NC	3.7	7.2	39	0.057	0.204	ND	1.395	3.436	5.065
2013.05.01	7.0	NC	2.7	6.1	40	0.049	0.173	ND	0.090	2.143	3.549
2013.06.11	7.1	10.8	NC	NC	14	NC	0.112	ND	NC	1.330	3.072
2013.07.02	7.0	NC	0.6	0.8	ND	0.033	0.085	ND	ND	2.080	2.927

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-7> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#3)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	7.2	NC	0.9	1.8	3	NC	0.154	0.164	0.156	3.131	3.180
2013.04.17	7.1	NC	4.7	9.1	180	0.029	0.106	0.552	ND	1.530	2.957
2013.05.01	6.9	NC	3.8	8.0	48	0.084	0.251	ND	ND	3.081	3.740
2013.06.11	7.0	10.3	NC	NC	ND	NC	0.958	ND	NC	2.215	3.765
2013.07.02	7.1	NC	0.4	1.9	26	0.393	0.380	ND	ND	0.397	1.213

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-8> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#4)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	6.8	NC	0.6	1.8	2	NC	0.126	0.109	0.149	3.149	3.360
2013.04.17	7.0	NC	0.9	1.4	9	0.058	0.098	ND	ND	2.966	3.160
2013.05.01	NS	NC	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2013.06.11	6.9	10.3	NC	NC	12	NC	3.019	ND	NC	2.795	4.089
2013.07.02	7.1	NC	0.3	1.5	ND	0.150	0.146	ND	ND	2.590	3.256

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-9> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#5)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	6.4	NC	0.7	1.5	7		0.031	ND	0.005	3.285	3.280
2013.07.16	6.8	NC	1.2	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	4.492	8.528

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-10> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#6)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	7.0	NC	1.0	2.2	6	NC	0.377	4.831	0.389	1.683	6.750
2013.04.17	7.3	NC	5.1	10.2	21	0.163	0.309	ND	0.407	8.395	9.904
2013.05.01	6.8	NC	3.7	7.5	70	0.140	0.315	ND	ND	4.073	5.004
2013.06.11	NS	NS	NC	NC	NS	NC	NS	NC	NC	NS	NS
2013.07.02	7.2	NC	0.3	2.6	ND	0.259	0.289	ND	ND	5.472	6.664

* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

<표 3-8-11> 유역단위 수질 모니터링 결과 (NWS-#7)

Date	기타	유기물질			기타	영양물질					
	pH	DO	BOD	COD _{Mn}	TSS	PO ₄ -P	T-P	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N
	mg/L										
2013.03.19	7.1	NC	0.9	2.1	10	NC	0.160	0.109	0.136	3.319	3.350
2013.07.02	7.2	NC	0.7	2.1	26	0.011	0.065	ND	ND	0.353	1.177

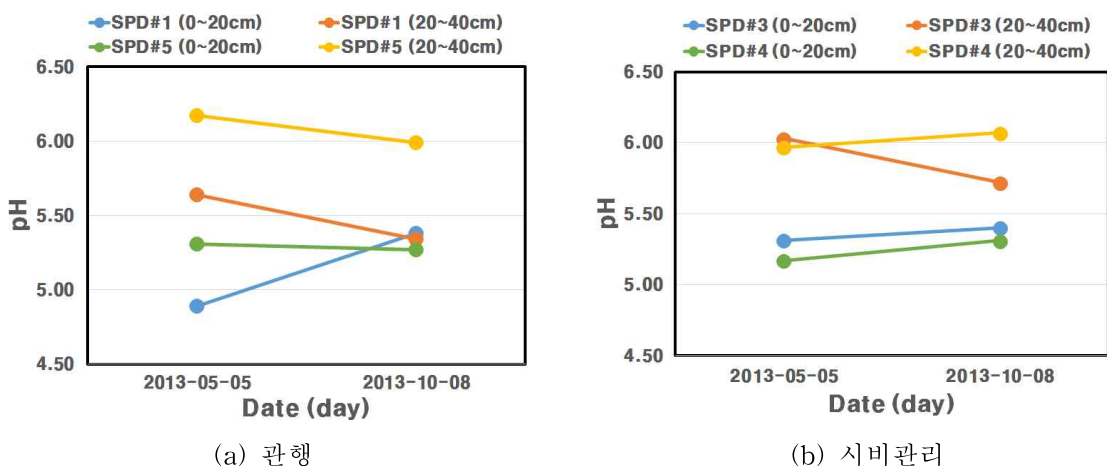
* ND: not detected, NC: not completed, NS: no sample

2.5. 토양자료

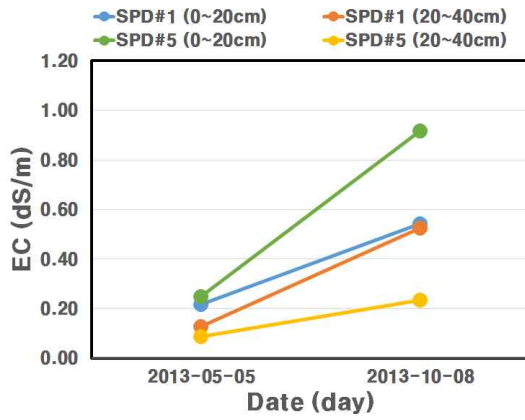
추후 모형의 입력 자료로 활용하기 위해 토양자료 DB를 구축하였다. 토양 자료의 대상 유역은 전라북도 익산시 춘포면 용연리에 위치한 논 포장을 선정하였다. 영농기 전, 후를 기준으로 심도별로 채취한 토양의 특성을 분석하였다. <표 3-8-12>, (그림 3-8-19) - (그림 3-8-22)는 모니터링 시기별, 처리구별, 심도별 토양특성분석 결과 pH, EC, TN, TP, TOC 항목에 대해 보여주고 있다.

<표 3-8-12> 심도별 토양 특성 결과 (2013) (sub-subject: fertilizer treatment)

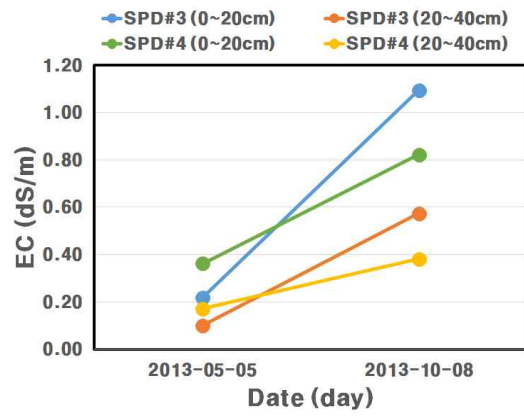
Date	Location	Depth (cm)	pH	EC (dS/m)	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	TOC (%)
Before growing season	Conventional	0~20	5.10	0.23	1,379.50	459.00	1.55
		20~40	5.91	0.11	565.50	263.38	0.75
	Fertilizer treatment	0~20	5.24	0.29	1,405.00	453.50	1.62
		20~40	6.00	0.14	556.50	262.93	0.54
After growing season	Conventional	0~20	5.33	0.73	1,680.00	457.59	1.72
		20~40	5.67	0.38	1,130.00	348.40	0.38
	Fertilizer treatment	0~20	5.36	0.96	1,665.00	476.25	1.66
		20~40	5.90	0.48	705.00	289.75	0.70



(그림 3-8-19) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (pH) (2013)

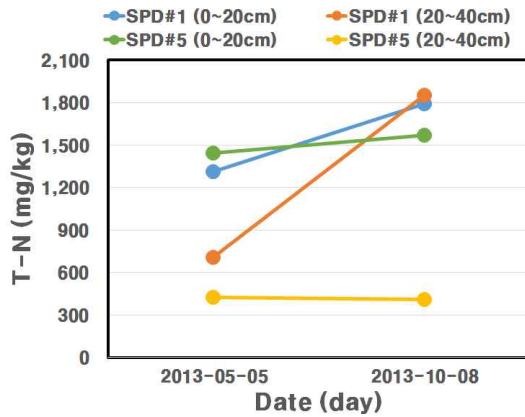


(a) 관행

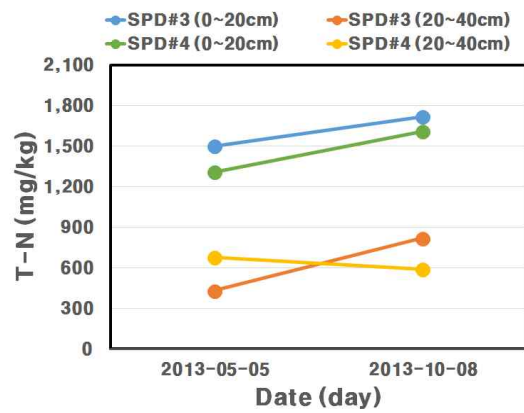


(b) 시비관리

(그림 3-8-20) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (EC) (2013)

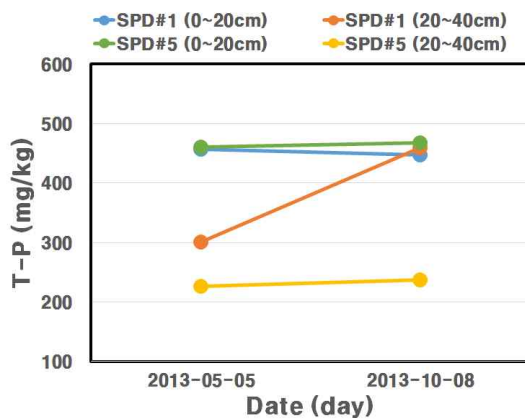


(a) 관행

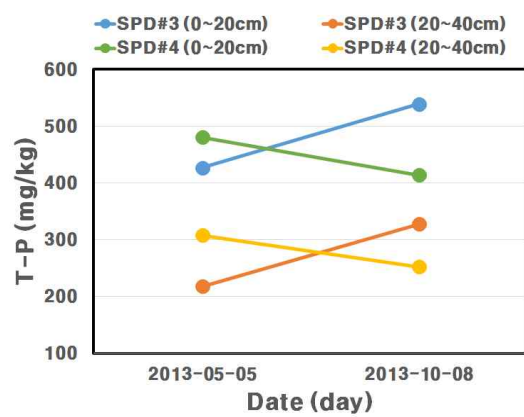


(b) 시비관리

(그림 3-8-21) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (T-N) (2013)



(a) 관행



(b) 시비관리

(그림 3-8-22) 관행 및 시비관리 처리구의 토양특성 (T-P) (2013)

2.6. 영농자료

한국농어촌공사 (2005)는 농업용수공급 현장에서의 조사결과에 의하면 영농상황과 농업용수 공급 상황에 차이가 있는 것으로 보고하였고, 이를 해결하기 위하여 묘대기, 이앙기, 본답기, 논물가두기 등의 영농변화를 조사, 분석하였다. 본 연구에서는 한국농어촌공사 (2005)의 자료를 바탕으로 영농자료 DB를 구축하였다. 영농자료는 농업용수 공급량 모의, 관개지구 배수량 모의 등에 이용된다. <표 3-8-13>은 지구별 작부시기를 나타낸다.

<표 3-8-13> 지구별 작부시기

지역	지사	지구명	묘대기	이앙기	본답기	논물 가두기	중간 낙수기	완전 낙수기	건답 직파 파종기	담수 직파 파종기
경기	평택	용덕 저수지	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
		이동 저수지	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
		방아 지선	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
		원암 지선	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
		남사 지선	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
		5-1호 지선	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-
	진원 간선	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-	
안성	미산 저수지	4/11 ~ 5/18	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/11	4/13 ~ 5/18	6/25 ~ 7/15	9/11	-	-	
충북	음성	맹동 저수지	4/30 ~ 5/19	5/12 ~ 5/26	5/27 ~ 9/25	4/28 ~ 5/11	6/25 ~ 7/15	9/25	-	-
	진천	백곡 저수지	4/8 ~ 5/19	5/14 ~ 5/24	5/26 ~ 9/25	4/20 ~ 5/17	6/25 ~ 7/15	9/25	-	-
충남	서천	덕용 저수지	4/10 ~ 5/22	5/17 ~ 6/3	5/4 ~ 9/25	4/20 ~ 5/17	6/25 ~ 7/15	9/25	-	-
		죽동 저수지	4/10 ~ 5/22	5/17 ~ 6/3	5/4 ~ 9/25	4/20 ~ 5/17	6/25 ~ 7/15	9/25	-	-
전북	군산	죽산 저수지	4/11 ~ 5/10	5/11 ~ 6/20	6/21 ~ 9/30	4/15 ~ 5/31	6/20 ~ 7/15	9/30	4/20 ~ 5/20	5/5 ~ 5/30
		이문 양수장	4/11 ~ 5/10	5/11 ~ 6/20	6/21 ~ 9/30	4/15 ~ 5/31	6/20 ~ 7/15	9/30	4/20 ~ 5/20	5/5 ~ 5/30
	순창	내월 양수장	4/20 ~ 5/20	5/4 ~ 6/6	6/7 ~ 9/30	4/25 ~ 5/19	6/25 ~ 7/25	9/30	4/20 ~ 5/20	5/5 ~ 5/30
접촌 양수장		4/20 ~ 5/20	5/4 ~ 6/6	6/7 ~ 9/30	4/25 ~ 5/19	6/25 ~ 7/25	9/30	4/20 ~ 5/20	5/5 ~ 5/30	
전남	해남	교동 양수장	4/15 ~ 5/25	5/13 ~ 6/11	6/12 ~ 9/30	5/6 ~ 6/7	6/25 ~ 7/25	9/30	-	4/20 ~ 5/20
		연곡 양수장	4/15 ~ 5/25	5/13 ~ 6/11	6/12 ~ 9/30	5/6 ~ 6/7	6/25 ~ 7/25	9/30	-	4/20 ~ 5/20
경북	문경	경천 저수지	5/7 ~ 5/22	5/14 ~ 6/1	6/2 ~ 9/20	5/9 ~ 5/27	6/25 ~ 7/15	9/20	-	-
		산남1 양수장	5/7 ~ 5/22	5/14 ~ 6/1	6/2 ~ 9/20	5/9 ~ 5/27	6/25 ~ 7/15	9/20	-	-
	성주	소성 저수지	5/18 ~ 6/5	5/25 ~ 6/10	6/11 ~ 9/25	5/20 ~ 6/5	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/1 ~ 4/30
		봉학 저수지	5/18 ~ 6/5	5/25 ~ 6/10	6/11 ~ 9/25	5/20 ~ 6/5	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/1 ~ 4/30
경남	창원	후포 양수장	5/18 ~ 6/5	5/25 ~ 6/10	6/11 ~ 9/25	5/20 ~ 6/5	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/1 ~ 4/30
		성남 양수장	5/18 ~ 6/5	5/25 ~ 6/10	6/11 ~ 9/25	5/20 ~ 6/5	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/1 ~ 4/30
		본포 양수장	5/12 ~ 5/31	5/21 ~ 6/12	6/13 ~ 9/25	5/14 ~ 6/9	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/20 ~ 5/20
		명촌 양수장	5/12 ~ 5/31	5/21 ~ 6/12	6/13 ~ 9/25	5/14 ~ 6/9	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/20 ~ 5/20
		산남 양수장	5/12 ~ 5/31	5/21 ~ 6/12	6/13 ~ 9/25	5/14 ~ 6/9	6/25 ~ 7/15	9/25	-	4/20 ~ 5/20

3. 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발

3.1. 개체관계도 설계

가. 데이터베이스 테이블 설계

본 연구의 데이터베이스는 기상, 수문, 수질, 토양, 영농인자 등으로 구성되어 있다. 각각의 자료를 총 8개의 테이블로 구성하였고, 테이블마다 자료코드를 할당하여 구분할 수 있도록 설계하였다. <표 3-8-14>는 본 대상구역에서 모니터링 하는 자료에 대한 테이블 이름, 내용, 항목을 정리하여 나타내고 있다. Station information 테이블은 대상구역 내에 선정된 모니터링 지점에 대한 정보를, Data code information 테이블은 각각의 세부항목에 대한 자료코드를 저장한다. Climate data 테이블은 대상구역의 지역별, 지점별 기상 관측 자료를, Hydrological data 테이블은 유량측정을 위한 각 지점별 수위 모니터링 자료를, Water quality data 테이블은 비점오염원을 정량적으로 산정하기 위한 지점별 수질 모니터링 자료를, Soil data 테이블은 대상구역 내 선정된 시험포장의 토양 특성 정보를, Farming factor data 테이블은 대상구역내의 영농인자 정보를, Stream information 테이블은 대상구역내의 하천에 대한 정보를 저장한다. 모니터링 대상 항목은 기상, 수문, 수질, 토양, 영농인자 등이며 구역의 특성을 온전히 반영하기 위해 정밀하게 측정하였다.

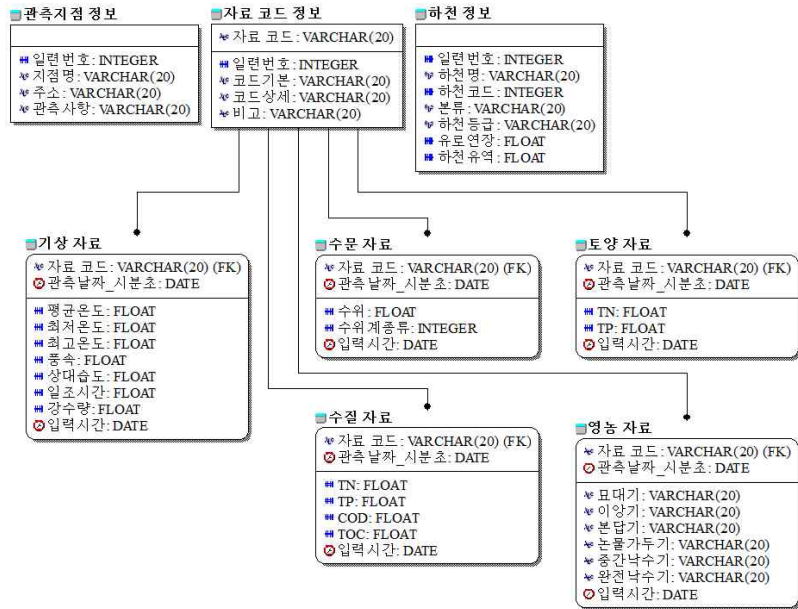
<표 3-8-14> 농촌용수종합정보 자료 설명

Table name	Description	Item
Station information	Information about monitoring stations	
Data code information	Data code types	
Climate data	Meteorological data of the study area obtained from KWA and AWS	Precipitation, Temperature, Wind speed, Relative humidity, Sunshine duration etc.
Hydrological data	Stage height to determine the discharge	Water depth, Ponding depth
Water quality data	Water quality data for each station	pH, EC, DO, Salinity, TN, TP, NO ₃ -N, EC etc.
Soil characteristics data	Soil characteristics data	Soil characteristics (once a year), TN, TP, NO ₃ -N, EC etc.
Farming factor data	Information of farming factor in the study area	
Stream information	Stream information of the study area	

* KMA: Korea meteorological administration, * AWS: Automatic weather station

나. 개체관계도 설계

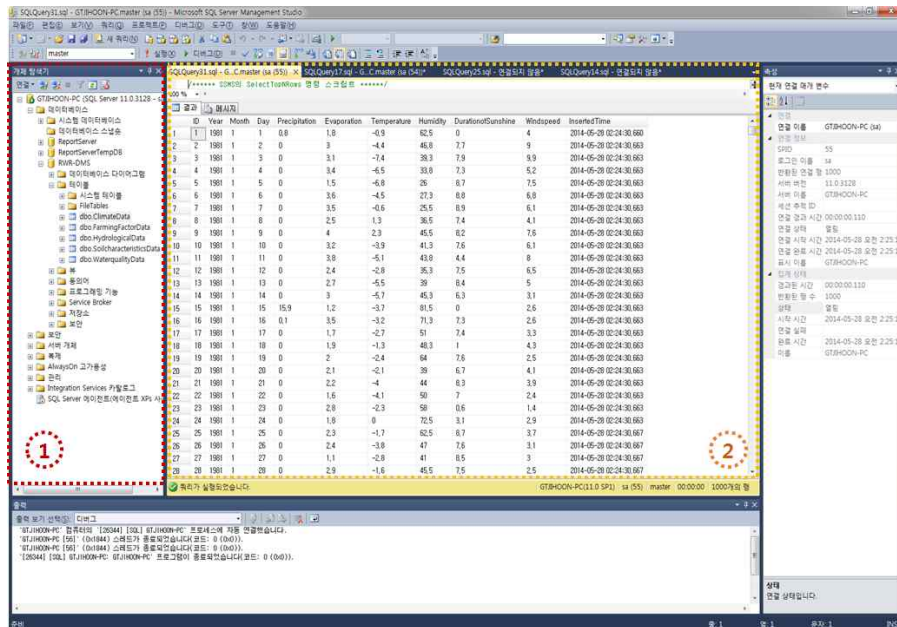
본 연구에서는 농촌용수 물순환 종합해석 모형을 개발의 입력 자료인 기상, 지형, 영농자료를 바탕으로 데이터베이스를 구축하였다. 상위 테이블로 관측지점 정보, 대상지구 정보, 하천 정보를 생성하였으며, 관측지점 정보 하위에 총 4개의 모형 자료 테이블 (상류구역정보, 기상, 저수지정보, 관개지구정보)을 설정하였다. (그림 3-8-23)은 본 연구에서 구축한 데이터베이스의 개체관계도 (Entity Relationship Diagram)를 보여주고 있다.



(그림 3-8-23) 개체관계도

3.2. 데이터베이스 구축

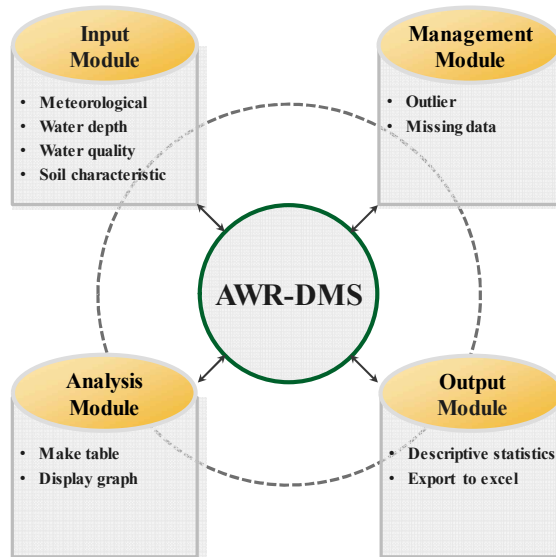
농촌용수 물순환 종합분석 모형은 시·공간 자료의 구축 및 관리가 필수적이다. 본 연구에서는 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 및 자료 표준화 시스템 개발을 위해 수집한 자료를 데이터베이스로 구축하였다. 데이터베이스의 종류는 관계형 DBMS (DataBase Management System)인 Microsoft SQL Serve 2012를 사용하였다. 개체관계도를 이용하여 테이블을 구축하고 SQL (Structured Query Language)언어를 이용하여 자료를 입력하였다. (그림 3-8-24)는 본 연구에서 구축한 데이터베이스의 메인화면을 보여주고 있다. (그림 3-8-24)의 ①은 개체탐색기로 구축한 테이블 목록을 확인할 수 있으며, ②는 결과 창으로 테이블의 자료를 조회하여 보여준다.



(그림 3-8-24) 농촌용수종합정보 데이터베이스

3.3. 인터페이스 구축

농촌용수종합정보 자료 관리 시스템은 자료 입력, 자료 관리, 자료 분석, 자료 출력 모듈로 구성되어있다. 자료 입력 모듈은 현장에서 수득한 모니터링 자료와 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 등에서 실시간으로 제공하는 자료를 선택적으로 읽은 다음, 기존의 개체관계도에 의해 구축한 데이터베이스에 입력하며, 자료 관리 모듈은 자료의 오류 등을 수정하여 자료의 품질을 관리한다. 자료 분석 모듈은 데이터베이스에 구축한 자료를 지점별, 시간별로 검색하는 기능과 그래프로 나타내는 기능을 가지며, 자료 출력 모듈은 구축한 자료를 지점별로 기술통계분석을 실시하여 보고서 형태로 출력한다. (그림 3-8-25)는 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템의 구조를 나타내고 있다. 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 개발을 위한 소프트웨어는 객체 지향 프로그래밍 언어인 Java (Oracle Java Standard Edition, Version 7, USA)를 사용하였다.



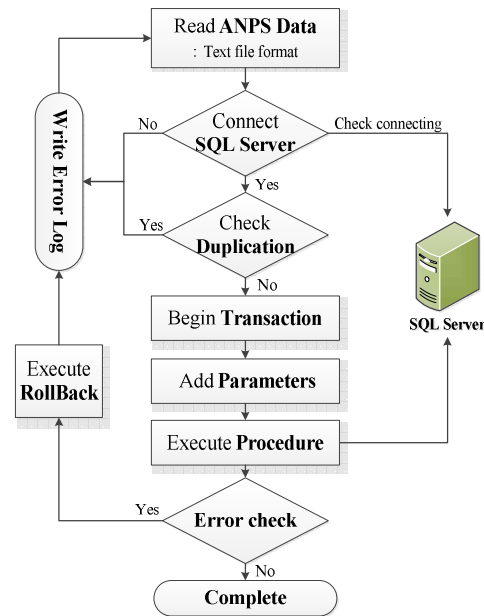
(그림 3-8-25) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 구조

가. 자료 입력 모듈

현장에서 모니터링 한 자료는 Text, Microsoft Excel 등의 파일형식으로 정리가 되어있기 때문에 이를 편집하여 데이터베이스에 입력하기 위해서는 자료를 변환 및 전송해주는 모듈과, 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 실시간으로 제공하는 자료를 축적해주는 모듈이 필요하다.

본 연구에서는 자료 입력 모듈을 개발하여 대상유역에서 모니터링 한 자료 및 실시간 자료를 데이터베이스에 입력하였다. 모니터링 한 자료 입력 과정은 모니터링 자료를 읽어온 다음, 테이블에 정의한 자료의 형태로 변환 후 SQL (Structured Query Language)문을 이용하여 데이터베이스에 입력하는 순서로 이루어진다. 모니터링 자료에 대해 중복검사 등의 오류 확인을 한 다음 데이터베이스에 입력한다. (그림 3-8-26)은 자료 입력 과정을 보여주고 있다. 기상자료, 수문자료와 같이 일단위로 축적되는 시

간 자료를 입력하기 위해 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)에서 제공하는 자료를 일단위로 갱신하여 입력하는 모듈을 개발하였다. 모듈은 기상청 및 WAMIS에서 제공하는 기상자료를 SQL (Structured Query Language) 및 API (Application Programming Interface)를 이용하여 농촌용수종합해석모형 데이터베이스에 입력한다.



(그림 3-8-26) 자료 입력 모듈

나. 자료 관리 모듈

모니터링 자료 중에는 이상치 (Outlier), 결측치 (Missing data) 등의 수정이 필요한 값들을 정확하게 확인하여 처리하는 것이 자료 품질 관리에 중요하다. 자료 관리 모듈은 모니터링 한 자료의 이상치, 결측치 관리 기준을 설정하여 자동 또는 수동으로 품질 관리를 수행하도록 설계하였다. <표 3-8-15>는 모니터링 자료 관리 기준을 강우량, 수위, 수질로 구분하여 나타내고 있다.

강우량 자료는 갑자기 0 mm으로 기록된 경우, 시간당 100 mm 이상의 강우가 내린 경우, 주변 관측소와 비교하여 10%이상의 차이가 발생할 경우 이상치로 판단하여 처리하도록 설계하였다 (한국건설기술연구원, 2004). 갑자기 0 mm로 기록된 경우에는 기계 오차의 가능성이 높다 판단하여 이상치로 기록하고 이전 시간대의 값을 자동으로 기록하도록 하였다. 시간당 100 mm 이상의 강우가 내린 경우와 주변 관측소와 10%이상 차이가 나는 경우에는 자료 확인을 위해 이상치로 기록하고 수동으로 수정하도록 하였다.

수위 자료는 갑자기 0 cm으로 기록된 경우 (한국건설기술연구원, 2004), 지난 한 해 동안의 10분 단위 모니터링 값들 간의 최대 차이 값보다 큰 경우, 기왕 최댓값보다 크거나 기왕최솟값보다 작은 경우 이상치로 판단하여 처리하도록 설계하였다. 강우량과 마찬가지로 갑자기 0 cm으로 기록된 경우에는 이상치로 기록하고 이전 시간대의 값을 자동으로 기록하도록 하였으며, 나머지 경우에 대해서는 자료 확인을 위해 이상치로 기록하고 수동

으로 수정하도록 하였다. 수위자료의 경우에는 대상유역 내 포장에 위치한 용·배수로의 수위 값이므로 수로의 최댓값을 설정하여 이보다 큰 값들은 이상치로 기록하여 자동으로 처리하도록 하였으며, 수풀이나 다른 작물들로 인해 이상치가 발생하는 경우 작물의 높이를 입력하여 그보다 큰 값에 대해서는 이전 값들과 비교하여 수정하도록 설계하였다.

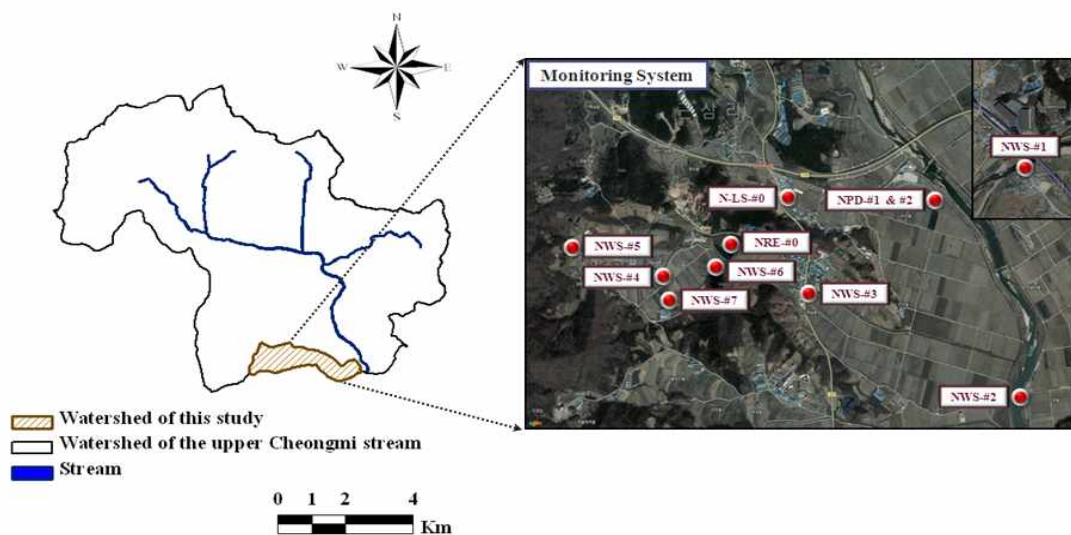
수질 자료는 갑자기 0 mg/L으로 기록된 경우, 일반적인 범위 값을 벗어나는 경우 이상치로 판단하여 처리하도록 설계하였다.

<표 3-8-15> 모니터링 자료의 이상치 관리 기준

Data type	Criteria	Reference
Precipitation	Suddenly 0 mm was recorded	(KICT, 2004)
	Over 100 mm per 1hour	
	Over 10% of the difference compared with the station around the site	
Water level	Suddenly 0 cm was recorded	(KICT, 2004)
	Over the maximum difference per 10 minute during the previous year	
	Over the previous maximum	
	Below the previous minimum or 0 cm	
Water Quality	Suddenly 0 mg/L was recorded	
	Over the normal range	

3.4. 대상유역 선정 및 현황

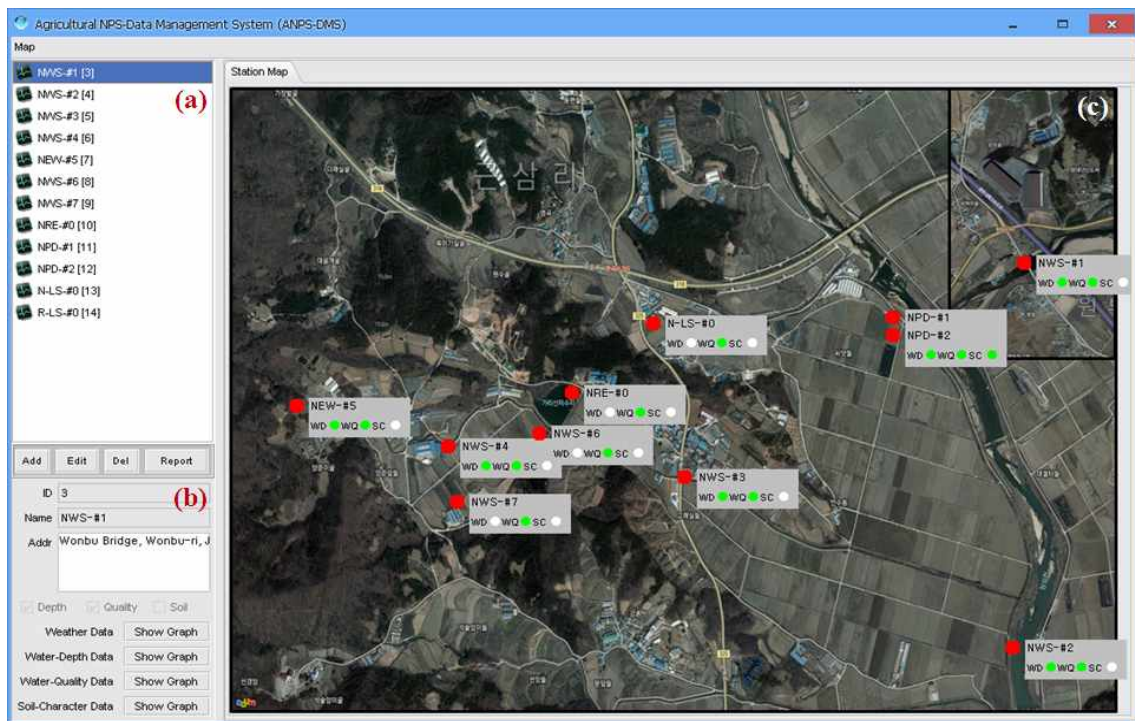
자료 관리 시스템 구축을 위한 대상유역으로는 소유역 단위의 정기 모니터링과 집중 모니터링을 실시하기 위해 남한강 하류유역 내에 위치하는 청미천 상류유역과 근삼리 유역을 선정하였다. 각 유역에 정기 및 정밀조사 지점을 지정하여 모니터링 장비를 광역 및 포장단위로 구분하여 설치한 다음 자료를 수집하였다. (그림 3-8-27)은 대상유역에 설치한 모니터링 시스템을 보여주고 있다.



(그림 3-8-27) 청미천 상류유역과 근삼리 유역의 모니터링 시스템

3.5. 자료 관리 시스템 적용

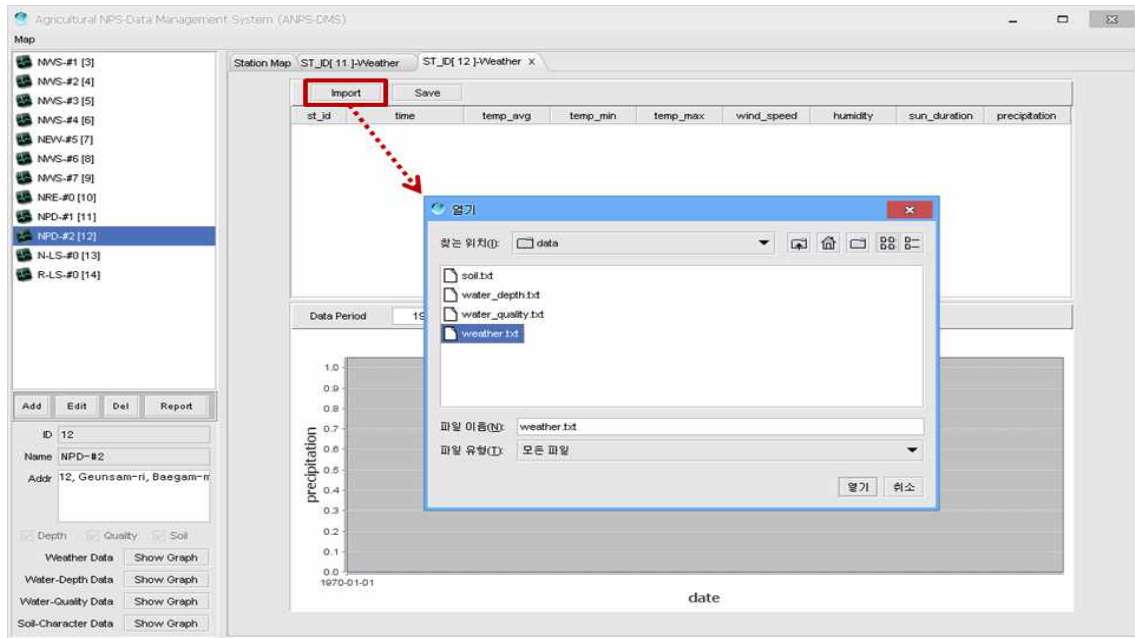
(그림 3-8-28)은 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템의 메인 메뉴 화면을 나타내고 있다. 왼쪽 상단 화면 (a)는 모니터링 지점을 관리하는 화면이며, 왼쪽 하단 화면 (b)는 지점별 자료 검색, 그래프 등의 기능을 나타내고 있다. 오른쪽 화면 (c)는 대상구역 지도 위에 모니터링 지점 위치와 모니터링 항목에 대한 정보를 보여주고 있다. 모니터링 지점은 사용자 편의에 따라 추가, 삭제 및 편집을 할 수 있으며 선택한 지점에 대한 자료 검색, 그래프 등의 기능을 수행할 수 있다. 대상구역 지도위에는 사용자가 추가한 모니터링 지점이 표시되며 각 지점에서 모니터링하고 있는 자료의 종류를 확인할 수 있다.



(그림 3-8-28) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 메인 메뉴: (a)지점 목록; (b)지점 속성; (c)대상구역 지도

가. 자료 입력 모듈

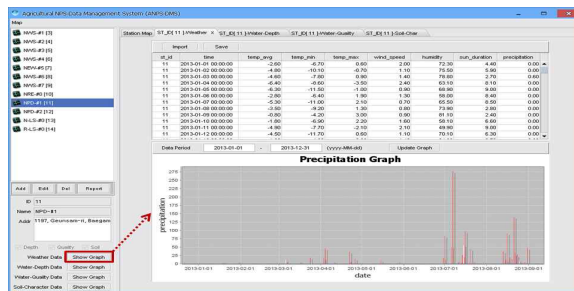
(그림 3-8-29)는 자료를 입력하는 과정을 나타내고 있다. 모니터링 한 자료를 입력하는 과정은 지점별로 따로 이루어진다. 자료를 입력하고자 하는 지점을 선정하고 Import 버튼을 눌러 파일을 추가한다. 파일은 모니터링 종류별로 Text 파일 형식으로 정리가 되어있어야 하며, 추가한 파일은 프로그램 내부 데이터베이스에 자동으로 저장된다.



(그림 3-8-29) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 입력 모듈

나. 자료 분석 모듈

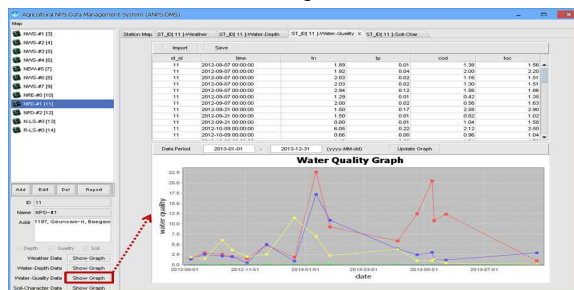
(그림 3-8-30)은 데이터베이스로 구축된 모니터링 자료를 분석하는 화면을 보여주고 있다. 강우, 수위, 수질, 토양특성으로 나누어 각각 테이블과 그래프로 나타내고 있다. 그래프는 특정기간을 선택하여 도시화할 수 있으며 자료 특성에 맞는 그래프 종류로 보여주도록 설계하였다.



(a) Precipitation



(b) Water depth



(c) Water quality

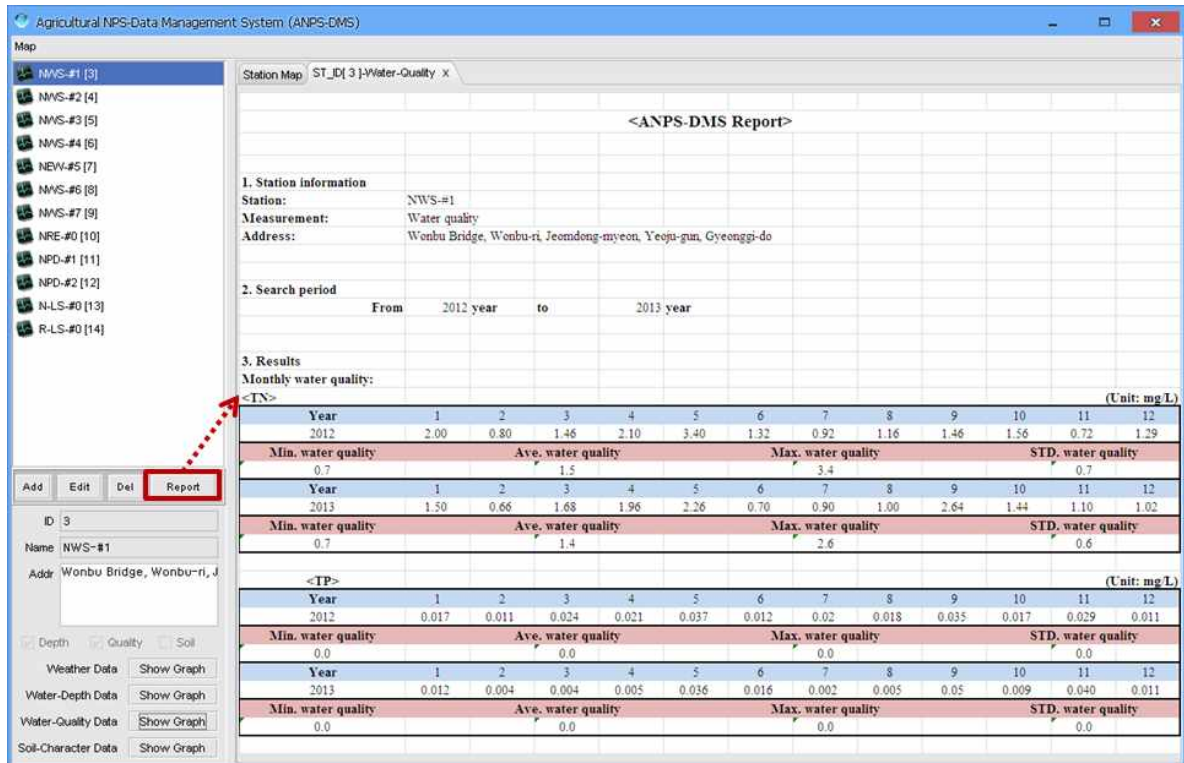


(d) Soil characteristic

(그림 3-8-30) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 분석 모듈

다. 자료 출력 모듈

(그림 3-8-31)은 데이터베이스로 구축된 모니터링 자료를 보고서를 출력하는 화면을 보여주고 있다. 보고서는 월별 평균값이 성분별로 기술되며, 자료 전체에 대한 기술통계분석을 실시하여 기본적인 통계량을 나타낸다. 기술된 보고서는 연단위로 정리되어 Microsoft Excel 파일형식으로 저장할 수 있다.



(그림 3-8-31) 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템 (AWR-DMS)의 자료 출력 모듈

4. 농촌용수종합정보 웹기반 시·공간 자료 표준화 시스템 개발

4.1. 기상 및 수문자료 표준화 기법

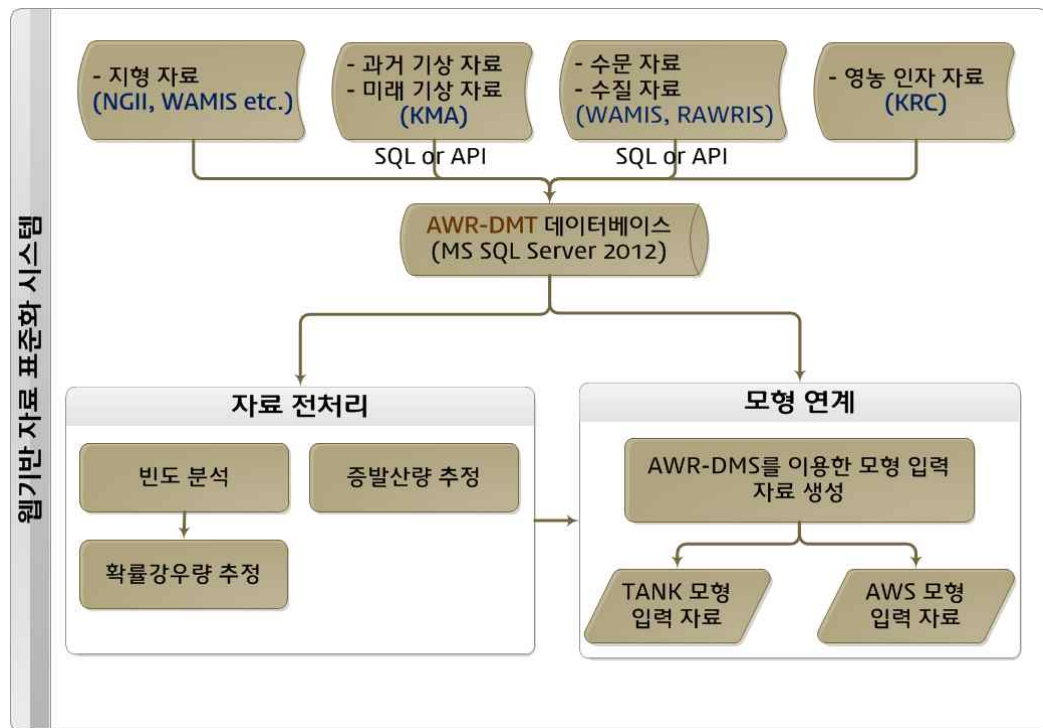
농촌용수종합정보해석을 위해서는 물순환 모형에 필요한 입력 자료를 구축하여 표준화하는 작업이 필수적이다. 본 연구에서 개발한 웹기반 자료 표준화 시스템 (Web-Based Data processing and Model linkage Techniques for Agricultural Water-Resource management, AWR-DMT)은 농촌유역 물순환 해석을 위해 필요한 다양한 자료를 구축하고 전처리과정을 거쳐 사용자의 필요와 모형의 입력 자료에 적합한 맞춤형 자료를 제공한다. 웹 기반으로 자료를 실시간으로 제공하여 농촌유역의 지능형 물순환 해석이 가능하도록 지원하는 방법이다.

농촌유역 물순환 해석을 위해 농촌유역 데이터베이스 설계, 농업생산기반시설 인벤토리 구축, 유역 물리특성/기상/수문 등의 데이터베이스 구축, 기후변화 자료를 구축하고 이를 웹으로 구현하였다.

개발 언어는 Python (PSF Python, Version 3.4.2, USA)을 선택하여 맞춤형 자료 전처리 모듈 개발 및 웹 프로그래밍을 수행하였다. Python은 문법이 간결하고 직관적인 특징을 있어 농촌유역의 복잡성 및 다양성을 수월하게 코드로 구현할 수 있으며, 웹 프로그래밍에 필요한 과학적인 연산, 데이터 가공, 그래프 및 보고서 작성에 이르는 다양한 라이브러리를 지원한다.

본 연구에서 개발한 기법은 농촌유역의 수문해석과 향후 수질해석기법 모델링을 위하여, ① 데이터베이스 구축, ② 자료 전처리 기법, ③ 물순환 모형 연계 기법 등으로 구성되며, 다양한 시·공간 정보를 농촌용수 해석에 효과적으로 이용 가능하도록 데이터베이스를 구축하고, 입력 자료를 생성하는 전처리 기법을 정립하고, 모듈 간 자료의 효율적 연계를 위한 자료의 형식 및 연계기술을 정립하였다.

(그림 3-8-32)는 자료 전처리 및 모형 연계 기법의 전체적인 구성과 흐름을 보여주고 있다. 기법의 각 단계별로 기술을 정립하였고 이를 웹과 연동하여 나타내었다.



* NGII: 국토지리정보원, * WAMIS: 국가수자원관리종합정보시스템, * KMA: 기상청, * RAWRIS: 농촌용수종합정보시스템, * KRC: 한국농어촌공사, * TANK: 저수지 상류 유역 유출량 해석 모형, * AWS: 농업용수 공급량 해석 모형

(그림 3-8-32) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT)의 구조

<표 3-8-16> - <표 3-8-21>은 본 연구에서 개발한 표준화 기법을 적용하기 위한 자료 형식을 나타내고 있다. 저수지 상류 유역 모듈, 저수지 물수지 모듈, 농업용수 공급량 모듈, 저수지 하류유역 모듈의 입력자료 및 출력자료의 자료 형식 및 단위를 정리하였다.

<표 3-8-16> 저수지 상류유역 모듈의 입력자료

입력자료	모의요소	자료형식	단위	비고
강우량	유역 증발 산량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온		실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도		실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간		실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속		실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도		실수 (소수점 2자리)	°	
위도		실수 (소수점 2자리)	°	
표고		실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이		실수 (소수점 2자리)	m	
상류 유역면적		매개 변수	실수 (소수점 1자리)	km ²
눈 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
밭 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
산림 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
유역경사	실수 (소수점 1자리)		%	
유로장	실수 (소수점 2자리)		km	

<표 3-8-17> 저수지 상류유역 모듈의 출력자료

출력자료	자료형식	단위	비고
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
지하 침투량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력

<표 3-8-18> 저수지 물수지 모듈의 입력자료

입력자료	자료형식	단위	비고
강우량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온	실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도	실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간	실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속	실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도	실수 (소수점 2자리)	°	
위도	실수 (소수점 2자리)	°	
표고	실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이	실수 (소수점 2자리)	m	
관개지구 면적	실수 (소수점 1자리)	km ²	배수량 모듈 입력값
상류 유역면적	실수 (소수점 1자리)	km ²	유입량 모듈 입력값
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	유입량 모듈 출력값 (일별)
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	배수량 모듈 출력값 (일별)
제한수위 관리기	정수	day	기간으로 입력
관개기	정수	day	기간으로 입력
환경용수 방류시기	정수	day	기간으로 입력
제한수위	실수 (소수점 1자리)	m	
사수위	실수 (소수점 1자리)	m	
만수위	실수 (소수점 1자리)	m	
표고수	정수		표고수의 입력값만큼 저수지 표고 - 면적 입력
저수지 내용적 (표고)	실수 (소수점 2자리)	m	
저수지 내용적 (면적)	실수 (소수점 2자리)	천 m ³	

<표 3-8-19> 저수지 물수지 모듈의 출력자료

출력자료	자료형식	단위	비고
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
만수위 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
제한수위 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
환경용수 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
저수지 저수량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
저수지 수위	실수 (소수점 1자리)	m	일별 출력

<표 3-8-20> 농업용수 공급량 모듈의 입력자료

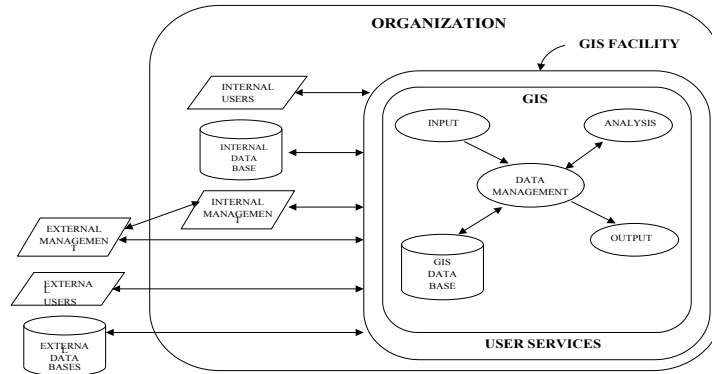
입력자료	모의요소	자료형식	단위	비고
강우량	농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온		실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도		실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간		실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속		실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도		실수 (소수점 2자리)	°	
위도		실수 (소수점 2자리)	°	
표고		실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이		실수 (소수점 2자리)	m	
침투량		실수 (소수점 1자리)	mm	
최대 담수심		실수 (소수점 1자리)	mm	
최소 담수심		실수 (소수점 1자리)	mm	
작부시기 (이앙기)		정수	day	기간으로 입력
작부시기 (본답기)		정수	day	기간으로 입력
작부시기 (중간낙수기)		정수	day	기간으로 입력
작물계수		실수 (소수점 2자리)		순별 입력
관개효율		실수 (소수점 1자리)		연별 입력 또는 일괄 입력 (선택)

<표 3-8-21> 농업용수 공급량 모듈의 출력자료

출력자료	자료형식	단위	비고
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
논 포장 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
용수로 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
시설재배지 유출량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
송수 손실량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
관개지구 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력

4.2. 지형자료 표준화 기법

지리정보시스템 (GIS)은 지리적 정보의 저장과 처리 등에 이용되는 컴퓨터에 기초한 시스템을 칭한다. 여기서, GIS는 지리적으로 대표되는 자료의 처리를 위하여 ① 입력, ② 자료 관리 (자료의 저장과 검색), ③ 자료의 생성과 분석, ④ 출력 등의 기능을 수행할 수 있는 시스템을 말한다. (그림 3-8-33)은 GIS의 기본적 성분과 그 환경을 정리한 것이다 (박승우, 2000).



(그림 3-8-33) GIS의 기본적 성분과 환경 (박승우, 2000)

모형의 입력 자료로 활용되는 유역의 각종 수문·수질 계수는 구축된 GIS 자료를 기반으로 추출할 수 있다. GIS 자료를 기반으로 구축할 수 있는 수문·수질 계수는 대표적으로 유역특성인자 (유역면적, 유로연장, 하천경사 등), 유출곡선번호 (CN), 토양유실 산정인자 (USLE) 등이 있다.

가. 유역특성인자 추출

수문·수질 모형의 구동에 필요한 유역특성인자에는 유역면적, 유로연장, 하천경사 등이 있다. GIS 상에서 작성된 각종 지형자료를 이용하여 각 유역특성인자들을 추출하였으며 추후 모형의 구동에 활용하기 위해 DB화 하였다.

나. 유출곡선번호 추출

유출곡선번호 (runoff Curve Number, CN)는 수문학적 토양-피복형의 성질을 대변하는 것으로서, 한 유역의 유출능력을 표시하는 유출곡선지수를 의미하며, 유역의 토지이용, 토양종류, 수문학적 토양조건 등에 의한 값으로 1~100의 범위를 갖는다. 생태환경 주제도의 지리정보시스템 자료 자동 생성을 위해서, 토양통, 토지이용, 경종방법, 수문조건 등에 따른 토양피복형을 생성하고, AMCII 조건의 SCS의 CN값은 식 (3-8-1)과 같이 정의된다. AMC 조건에 따른 CN I, CNIII 값은 다음 식 (3-8-2), 식 (3-8-3)과 같이 추정한다.

$$CN_{II} = \frac{25,400}{S + 254} \quad (3-8-1)$$

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281 CN_{II}} \quad (3-8-2)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573 CN_{II}} \quad (3-8-3)$$

여기서, S는 유역의 최대잠재보유수량과 초기손실의 합을 나타낸다.

국토해양부 (2012)에서는 설계홍수량 산정 방법에 대한 명확한 기준을 제시하기 위해 ‘설계홍수량 산정요령’을 발간하였으며, 토지이용 및 수문학적 토양군에 따른 CN값의 기준 또한 제시하였다. <표 3-8-22>는 국토해양부에 의해 제시된 CN값의 기준을 나타내고 있으며, 이에 기초하여 GIS를 이용해 이동저수지 유역에 대한 CN 지도를 작성하고 유역 CN값을 계산하였다.

<표 3-8-22> 토지이용 분류에 따른 유출곡선지수 기준 (AMC-II) (국토해양부, 2012)

토지피복도		수문학적 토양군				비 고 (SCS 분류기준 등)
중분류	코드	A	B	C	D	
주거지역	110	77	85	90	92	주거지구, 소구획 500 m ² 이하
공업지역	120	81	88	91	93	도시지구, 공업지역
상업지역	130	89	92	94	95	도시지역, 상업 및 사무실지역
위락시설지역	140	49	69	79	84	
교통지역	150	83	89	92	93	도로, 포장도로(도로용지포함)
공공시설지역	160	61	75	83	87	주거지구, 소구획 500 - 1,000 m ²
논	210	79	79	79	79	별도기준(논)
밭	220	63	74	82	85	조밀경작지, 등고선경작, 불량
하우스재배지	230	76	85	89	91	도로, 포장, 개거
과수원	240	70	79	84	88	이랑경작지, 등고선경작, 불량
기타재배지	250	68	79	86	89	자연목초지 또는 목장, 불량
활엽수림	310	48	69	79	85	
침엽수림	320	48	69	79	85	산림, HC=2
혼효림	330	48	69	79	85	
자연초지	410	30	58	71	78	초지, 등고선 경작, 양호
골프장	420	49	69	79	84	개발지, 보통
기타초지	430	49	69	79	84	자연목초지 또는 목장, 보통
내륙습지	510	100	100	100	100	별도기준(수면)
연안습지	520	100	100	100	100	별도기준(수면)
채광지역	610	68	79	86	89	개발지, 불량
기타나지	620	77	86	91	94	개발 중인 지역
내륙수	710	100	100	100	100	
해양수	720	100	100	100	100	

다. 토양유실 산정인자 추출

토양유실 산정인자는 수질모델링의 핵심 요소 중 하나로 많은 모형에서 유사량의 추정과 관련된 매개변수에 널리 이용되고 있다.

(1) 강우가식성인자 (R)

강우가식성인자 (R)는 빗방울이 가지는 운동에너지에 의해 토양을 침식시킬 수 있는 능력이다. 본 연구에서는 강문성 등 (2003)이 전국의 26개 주요 관측소를 대상으로 1973년 - 2002년까지의 10분 및 1시간 강우자료를 분석하여 얻은 R 값을 이용하였다. 이동저수지 유역 인근의 양평, 이천, 수원, 서산, 청주 지점의 R 값을 IDW (Inverse Distance Weighted) 보간기법을 이용하여 30m×30m 그리드 자료로 변환 후 격자별 R 값을 적용시켰다.

(2) 토양침식인자 (K)

토양침식인자 (K)는 토양이 강우에 의한 침식에 대해 저항하는 능력을 나타내는 척도로서, 토양입자 및 분포, 구조, 공극 및 공극크기, 유기물 함량 등에 관계된다. Wischmeier은 토양에서의 미사와 극미사의 구성비가 70 % 이하의 경우 K 값을 정의하였으며, 이를 Foster는 이를 SI 단위로 환산하여 식 (3-8-4)와 같이 정의하였다.

$$1000K = 2.8 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - a) + 4.3(b - 2) + 3.3(c - 3) \quad (3-8-4)$$

여기서, M : (실트와 극세사의 백분율) × (100-점토의 백분율), a : 유기물 함량 (%), b : 토양구조 (1 - 4), c : 투수도 등급 (1 - 6)을 나타낸다.

(3) 지형인자 (LS)

경사장과 경사도가 토양유실에 미치는 영향을 나타내는 인자는 각각 L 과 S 이며, 이들은 각각을 구분하지 않고 흔히 지형인자 (topographic factor) LS 로 나타내고 있다. USLE의 제 인자는 표준포를 기준으로 하며, 지형인자는 다음의 식 (3-8-5)로부터 계산된다 (Wischmeier et al., 1978).

$$LS = \left(\frac{\chi}{22.13} \right)^m (0.0065 + 0.045s + 0.0065s^2) \quad (3-8-5)$$

여기서, χ : 경사장 (m), s : 지면경사도 (%), m : 지면경사에 따라 변하는 무차원지수이다. 경사장은 지표유흐류가 시작되는 지점으로부터 경사도가 감소하여 퇴적이 발생하는 지점 혹은 지표유흐류가 집중되어 충분히 발달된 수로 형태의 흐름으로 되는 지점까지의 거리로 산정한다.

(4) 작물경작인자 (C)

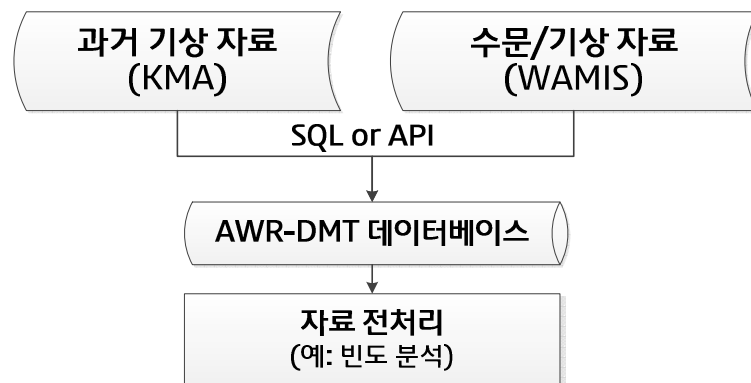
작물경작인자 (C)는 강우·토양·지형조건이 동일한 경우에 특정한 작물이나 피복조건에서 발생한 토양유실량과 표준포의 상태에서 휴경과 경운조건에서 발생한 토양유실량의 비로 결정된다. 작물경작인자는 경사지의 피복상태·운작조건·수확량의 수준·재배기간·경운방법·작물잔재상태·강우분포 등의 복합적인 영향을 표시한다.

(5) 침식조절관행인자 (P)

침식조절관행인자 (P)는 특정한 침식조절관행인자에 의한 토양유실량과 표준포에 적용한 상하 경운방법에 따른 유실량의 비이다. 침식조절관행에는 등고선경작 (contouring), 등고선대상재배 (contour strip cropping), 테라스공법 (terracing) 등이 포함된다.

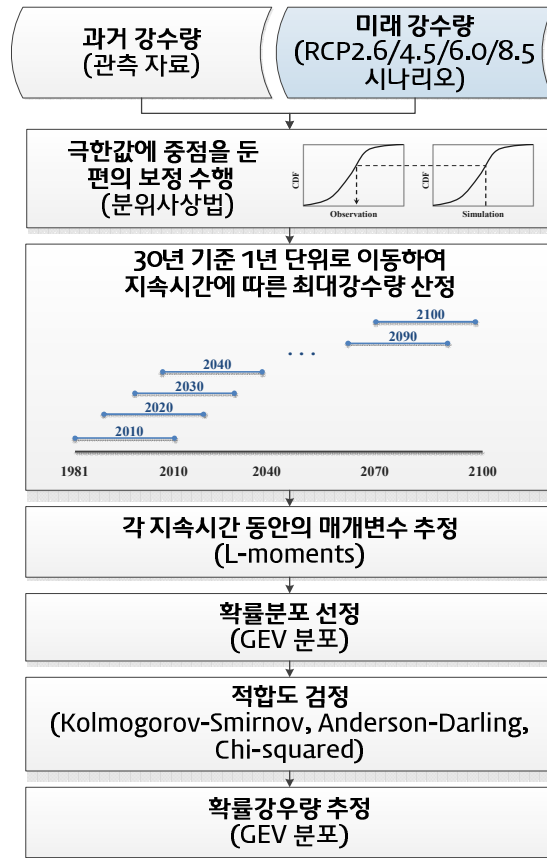
4.3. 농촌용수종합정보 자료 전처리 기법 개발

농촌유역 물순환 종합해석 모형은 시·공간 자료의 구축 및 관리가 필수적이다. 본 기법은 모형 개발에 필요한 자료를 정리하여 데이터베이스로 구축하였으며, 기상자료와 같이 일단위로 축적되는 시간자료를 입력하기 위해 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 (Water resources management information system, WAMIS)에서 제공하는 자료를 일단위로 갱신하고, 기상자료에 대한 빈도분석을 실시하는 모듈을 개발하였다. 자료 구축 모듈은 기상청 및 WAMIS에서 제공하는 기상자료를 SQL (Structured query language) 및 API (Application programming interface)를 이용하여 본 연구의 데이터베이스에 입력한다. 빈도분석 모듈은 최신 자료를 수집하여 각 기상자료 별 연최대치자료를 이용하여 빈도분석을 수행한다. (그림 3-8-34)는 자료 구축 및 자료 전처리 모듈의 순서도를 보여주고 있다. 먼저, 기상청에서 관측한 강수자료와 기상청 산하 국립기상연구소에서 제공하는 미래 강수자료를 데이터베이스로 구축하였다. 전국 기상관측소에서 관측한 기상자료는 기온, 강수량, 바람, 습도, 일조시간 등이 있으며 일별 및 시간별로 제공하며, OPEN API를 이용하여 실시간으로 접속하여 농촌유역 물순환 데이터베이스에 구축하였다. 미래 강수자료는 국립기상연구소에서 제공하는 미래 기후변화 시나리오를 사용하여 구축하였다.



(그림 3-8-34) 자료 전처리 과정

(그림 3-8-35)는 자료 전처리 과정 중 하나인 빈도분석에 대해 설명하고 있다. 농촌유역 물순환 데이터베이스에 기상관측소별로 구축한 기상자료 중 미래 강수자료에 대해 편의보정을 수행한다. 과거 기상자료와 편의보정된 미래 강수자료에 대해 30년을 기준으로 지속시간별 연최대강수량을 계산하여 비정상성을 고려한 빈도분석을 실시하고 최종적으로 재현기간별 확률강우량을 도출한다.



(그림 3-8-35) 빈도분석 과정

편의보정은 동역학적 모형에 내재하고 있는 시스템적인 오차를 해결하기 위해 많이 적용하고 있다. 일반적인 편의보정 방법은 각 자료군에 대해 기술적인 통계량을 기준으로 수행하나 극한사상과 같이 단기간에 발생하는 강우사상에 대해서는 효과적으로 일괄적으로 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 극한값에 초점을 맞춘 편의보정 방법인 분위사상법을 수정 및 보완하여 지역기후변화 시나리오에서 산출된 과거 및 미래 강수 자료의 극한사상을 보정하였다. 분위사상법은 기존의 방법들에 비해 모의자료에 내재한 변동성과 통계적 특성까지 모두 고려할 수 있어 극한사상을 보정하는데 적합하다 (Kim et al., 2008). 분위사상법을 적용하기 위해서는 강수자료를 적합시킬 누적확률분포를 선정하여야 한다. 본 연구에서는 GEV 분포를 선정하여 편의보정을 수행하였다. GEV 분포는 상위 꼬리부분의 면적이 커서 극한사상의 비초과확률을 보다 정확하게 산정할 수 있는 장점이 있다 (Sung et al., 2012). GEV 분포의 누적분포함수는 식 (3-8-6), 식(3-8-7)와 같이 표현할 수 있다 (Stedinger et al., 1993).

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right], \kappa \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left(\frac{x - \xi}{\alpha}\right)\right], \kappa = 0 \end{cases} \quad (3-8-6)$$

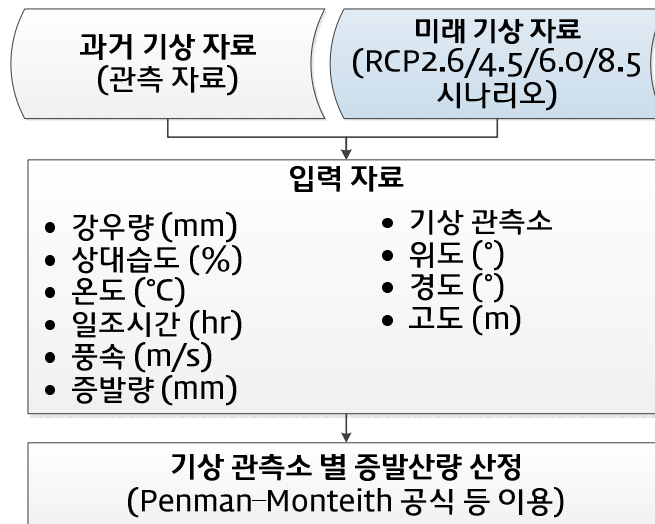
$$x = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - [-\log(P)]^\kappa\}, \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha \log[-\log(P)], \kappa = 0 \end{cases} \quad (3-8-7)$$

위 식에서 ξ , α , κ 는 위치 (location), 규모 (scale), 형상 (shape) 매개변수를 의미한다. GEV 분포는 3개 매개변수가 결합된 형태로 형상매개변수인 κ 값에 따라 극치 Type I ($\kappa=0$), Type II ($\kappa<0$), Type III ($\kappa>0$)로 구분할 수 있다 (Stedinger et al., 1993).

최근 강수사상을 살펴보면 시간에 따라 강수형태가 변하고 있으며 강우강도 역시 무작위하게 발생하는 경향이 있다. 시간에 따라 변하는 강수사상을 정확하게 분석하기 위해서는 강수자료에 대한 비정상성 빈도해석이 필요하며 본 연구에서는 비정상성 해석을 위해 30년을 기준으로 1년 단위로 이동하여 기간별 빈도분석을 실시하였다.

위에서 설정한 기간별로 지속시간별 연최대강우량을 산정하고 GEV 확률분포에 대한 매개변수 추정을 실시하고, 추정을 통해 얻은 매개변수를 적용하여 얻은 GEV 확률분포와 관측값과의 오차를 평가하는 적합도 검정을 수행하였다. 최종적으로 GEV 확률분포를 이용하여 재현기간별 확률강우량을 산정하였다.

(그림 3-8-36)은 자료 전처리 과정 중 하나인 증발산량 산정에 대해 설명하고 있다. 기 구축한 농촌유역 물순환 데이터베이스로부터 기상자료와 관측소 위치 정보 등을 가져온 다음 증발산량을 여러 가지 식을 이용하여 산정한다. 증발산량은 Penman-Monteith 식, 수정 Penman 식, Blaney-Criddle 식 중 사용자 선택에 따라 사용할 수 있도록 구성하였다.

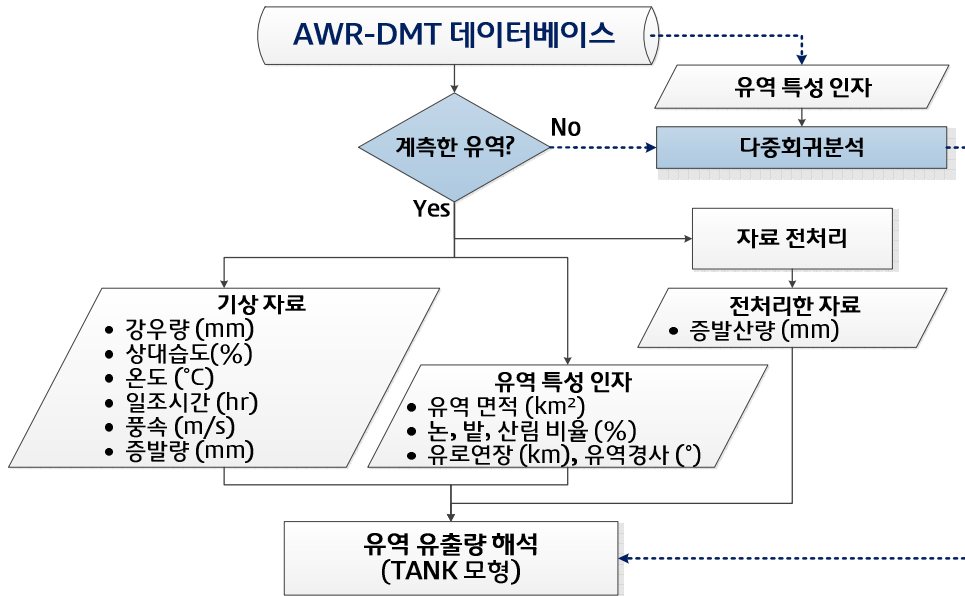


(그림 3-8-36) 증발산량 산정 과정

4.4. 농촌용수종합정보 모형 연계 기법 개발

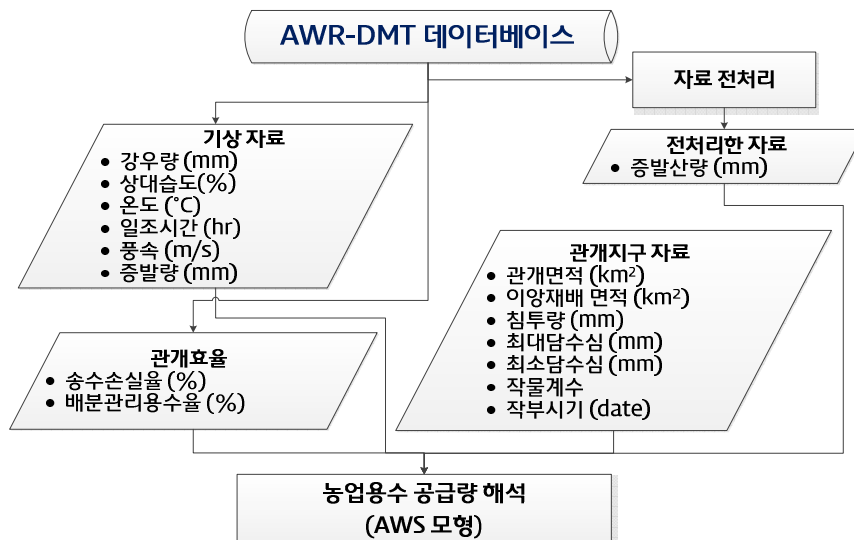
(그림 3-8-37)은 모형 연계 기법 중 하나인 상류 유역 유출량을 모의하기 위한 입력 자료를 구축하는 과정에 대해 설명하고 있다. 먼저 유출량을 모의하고자 하는 유역이 계측 유역인지 미계측 유역인지를 구분하여 필요한 자료를 기 구축한 농촌유역 물순환 데이터베이스로부터 가져온다. 계측 유역의 경우 기상자료, 유역특성인자, 전처리

과정을 거친 증발산량 자료 등을 가져온 다음 TANK 모형 매개변수를 구축한다. 미계측 유역의 경우 기 구축한 농촌유역 물순환 데이터베이스로부터 유역특성인자를 가져온 다음 안지현 등 (2015)이 제시한 TANK 모형의 매개변수 추정 회귀식을 이용한다.



(그림 3-8-37) 유역 유출량 모형 연계 기법

(그림 3-8-38)은 모형 연계 기법 중 하나인 농업용수 공급량을 모의하기 위한 입력 자료를 구축하는 과정에 대해 설명하고 있다.



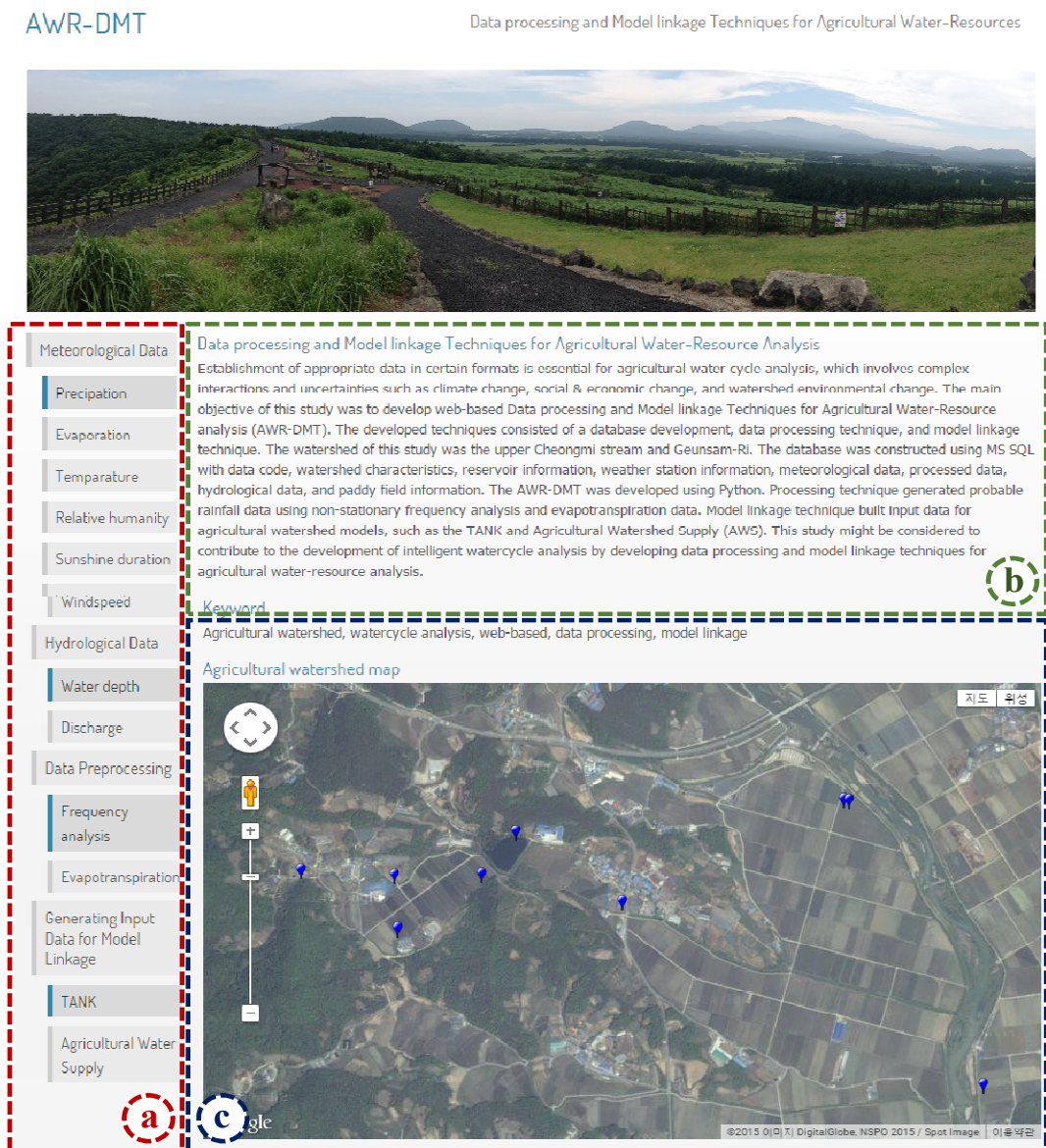
(그림 3-8-38) 농업용수 공급량 해석 모형 연계 기법

본 연구에서는 송정현 등 (2015)이 제시한 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용수 공급량을 모의 기법을 기준으로 입력 자료를 구축하였다. 기 구축한 농촌유역 물순환 데이터베이스로부터 기상자료와 관개효율 자료, 관개지구 자료 등을 가져온 송정현 등 (2015)이 제시한 방법에 맞게 입력 자료를 구축한다.

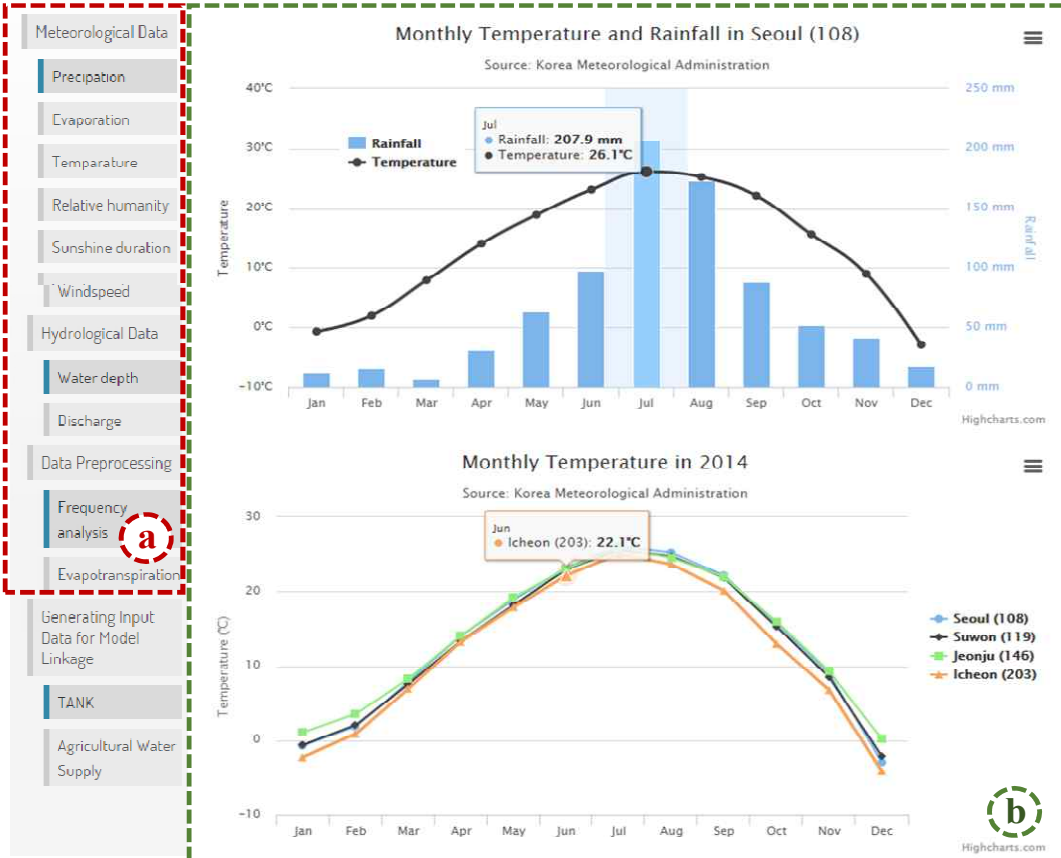
4.5. 농촌용수종합정보 웹기반 자료 표준화 시스템 적용

농촌용수종합정보해석을 위해 구축된 데이터베이스를 기반으로 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT)을 적용하였다. 데이터베이스에 구축되어있는 기상 및 수문 자료를 웹사이트에 도시화하여 자료 종류별 기간별로 사용할 수 있도록 설계하였고, 물순환 모형에 대한 입력 자료에 맞추어 자료를 표준화하는 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 자료 표준화 시스템을 적용하기 위해 TANK 모형과 농업용수 공급량 모의 모형 (Agricultural Watershed Supply, AWS)을 선정하였다. 안지현 등 (2015)은 미계측 저수지 상류 유역의 유출량을 추정하기 위해 개념적 강우-유출 모형인 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발한바 있으며, 송정현 등 (2015)은 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용수 공급량을 모의하여 제안한 바 있다 ((그림 3-8-39), (그림 3-8-40)).



(그림 3-8-39) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT) 웹 페이지 메인화면, (a): 자료 표준화 시스템의 메인 메뉴 구성 화면, (b): 자료 표준화 시스템에 대한 설명 및 시스템에 대한 설명 화면, (c): 농촌유역에 대한 지도 화면



(그림 3-8-40) 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템 (AWR-DMT) 웹 페이지 세부화면 (a): 기상 자료에 대한 세부 메뉴 화면, (b): 전처리를 수행한 기상 자료에 대한 그래프 화면

5. 요약 및 결론

본 장에서는 객체지향 기반 물순환 해석 모델링을 위하여, 다양한 시·공간 정보를 농촌용수 해석에 효과적으로 이용 가능하도록 데이터베이스를 구축하고, 자료를 관리하고 효과적으로 도시화하는 자료 관리 시스템을 개발하였다. 이에 더 나아가 수문모형의 입력자료 표준화 기법을 제공하고, 수질해석 모형으로의 확장성을 고려하여 지형자료 표준화 기법을 제공하며, 농촌용수종합정보 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 제공하는 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템을 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 농촌용수 시범지구인 용남지구에 대한 기상자료로 인근의 수원기상관측소 자료를 이용하여 강수량, 기온, 풍속, 상대습도, 일사량 등에 대해 과거 30년 자료를 조사하여 DB로 구축하였다.
- ② 용남지구에 대한 GIS자료로, DEM, 수계도, 토지이용도, 토양도, 지형도 등을 구축하였다. 또한, 구축된 지형정보로부터, 유역을 추출하고, 유출량 산정을 위한 곡선번호지수 추출, 토양유실 인자를 결정하는 방법을 정립하고 인자를 산정하였다.
- ③ 농촌용수 시범지구인 청미천 상류역과 근삼리 유역에 대한 수문, 수질자료로, 포장단위 모니터링과 유역단위 모니터링을 실시하여 수득한 유량자료와 수질자료를 DB로 구축하였다.
- ④ 농촌용수 시범지구인 춘포면 용연리에 논 포장에 대한 토양자료로, 모니터링 시기별, 처리구별, 심도별로 pH, EC, TN, TP, TOC 항목에 대한 자료를 DB로 구축하였다.
- ⑤ 용남지구에 대한 영농자료로, 묘대기, 이앙기, 본답기, 논물가두기 등의 영농변화 등의 자료를 수득하여 DB로 구축하였다.
- ⑥ 농촌용수지구의 물 순환 해석을 위한 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템(AWR-DMS)을 개발하여 국가종합수자원정보시스템 등에서 실시간으로 제공하는 시계열 자료를 일단위로 SQL 및 API 기법을 이용하여 DB로 구축하고, 자료 품질 관리를 수행하였다. 남한강 하류 청미천 상류유역과 근삼리 유역에 대해 자료 관리 시스템의 적용성을 검토하였다.
- ⑦ 농촌용수지구의 물 순환 해석을 위한 농촌용수종합정보 자료 표준화 시스템(AWR-DMT)을 개발하여 물순환 모형에 대한 입력 자료에 맞추어 자료를 전처리하는 기법과 유역 유출량 및 농업용수 공급량 등을 산정할 수 있도록 지원하는 모형 연계 기법을 구현하였다.

본 장의 연구 결과는 다양하게 존재하는 시·공간 자료를 농촌용수를 종합적으로 해석하기 위해 데이터베이스로 구축하여 자료를 관리하는 시스템을 제공하고, 수문 및 수질 모형을 모의함에 있어 필요한 자료를 전처리 과정을 통해 각각 맞춤형으로 구성하는 표준화 시스템을 제공할 수 있어 농촌용수 물 순환의 다각적인 분석을 할 수 있는 토대를 제공할 수 있을 것이라 사료된다.

제 9 절 시험지구 현황조사 및 물순환 모니터링

1. 서론

농어촌의 급격한 사회, 경제 및 환경변화에 따라, 공급 계획량 설정 및 용수의 관리에 있어서도 선진화, 과학화를 위해 물관리 자동화 시스템을 도입하여 현대적인 수리시설물의 설계 등의 사업을 통한 기술발전을 추진하고 있다. 농촌용수의 물관리 자동화는 수리시설물의 관리에 있어 전기, 컴퓨터, 통신 등의 첨단 기술을 이용한 자동 관리시스템을 구축하여 중앙관리소에서 전체지구의 용수수급현황을 원격감시, 조작하는 것을 말하며, 최근에는 무선통신, CDMA(Code Division Multiple Access), 위성영상 등을 이용한 실시간 물관리 기술 개발이 추진되고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가를 위해서는 우선 농촌용수구역의 시험지구 선정과 모니터링 시스템 구축이 필요하다. 신뢰성 있는 모니터링 자료의 구축은 모형의 개발 및 적용성 평가의 필수 선행요소로서, 이를 위해서는 효과적인 모니터링이 가능하면서도 농촌유역을 대표할 수 있는 시험대상지구를 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 시험지구 선정을 위한 4가지 기준을 설정하였다.

첫째, 연구 결과의 타당성 확보를 위해서는 조사 대상지가 본 연구의 연구 대상이 되는 농촌 유역의 일반적인 특성을 가장 잘 대표할 수 있어야 한다. 둘째, 현장 적용성이 높은 모형이 될 수 있도록 시험, 운영 및 분석이 가능함과 동시에, 일선 물관리 기관 (농어촌공사 지사 혹은 시·군 지자체)에서 실시하고 있는 기존의 모니터링과 비교가 가능하여야 한다. 셋째, 현장시험에 적합한 시험지구를 선정하기 위해 농업수리시설의 종류와 규모가 다양할 뿐만 아니라 기존의 관측자료가 있는 곳을 선정하였다. 넷째, 제한된 시간과 자원으로 수시적인 모니터링이 수행하기 위해서 연구기관과 시험지구까지의 근접성 및 교통의 용이성을 확보할 수 있어야 한다. 이와 같이 다양한 조건을 고려하여 이동지구, 동진지구, 농어촌연구원 시험포장 등 총 3개의 국내 시험지구를 선정하고, 우즈베키스탄 타슈켄트 유역 등 해외 시험지구를 선정하였다.

또한 농촌용수 종합 해석 모형의 일반성을 검토하기 위해서는 선정한 시험지구 이외의 다수 저수지에 대한 적용 및 검토가 필요하다. 이를 위해서는 농업용수 종합해석 모형의 구동 혹은 검정에 사용되는 관련 자료들의 분석이 필요하다. 따라서 여러 농업용 저수지에 확장하여 적용하고자 다수의 농업용 저수지에 대한 관련 자료를 구축하였다.

본 장에서는 ① 농촌용수 물순환 종합해석 모형의 적용을 위한 시험지구를 선정하고, ② 시험지구의 현황을 조사하고, ③ 시험지구 물순환 모니터링 실시 및 자료의 품질 평가를 실시하고, ④ 농업용수 종합해석 모형 관련 자료를 구축하였다.

2. 시험지구 현장 수리시설 및 현황조사

2.1. 국내 시험지구

가. 이동지구

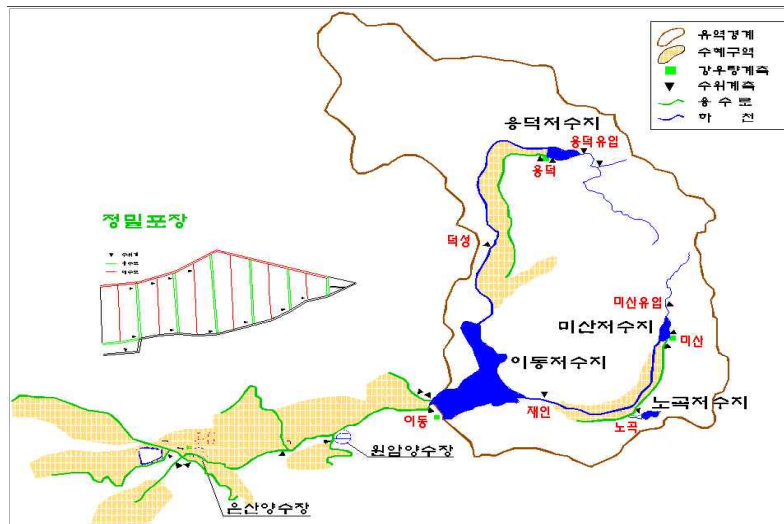
첫 번째 시험지구는 경기도 용인의 이동저수지와 그 관개지구인 이동지구를 선정하였다. 이동지구는 행정구역으로는 경기도 남동부인 용인시 이동면, 남사면 일원이며

서쪽은 경기도 오산시, 남쪽은 평택시, 안성시 그리고 북쪽은 용인시와 인접하고 있다.

시험지구의 주요 수원공인 이동저수지의 유역은 9,428 ha로서 상류유역에 용덕저수지(유역면적 1,246 ha)와 미산저수지(유역면적 444 ha), 노곡저수지(유역면적 191 ha) 3개 저수지가 있으며 2개의 유입하천으로 유역에서의 유출량이 유입되고 있으며 이동저수지의 방류수는 진위천을 통하여 평택호로 유입된다. 이동지구의 관개는 저수지 4개소와 양수장 3개소를 통해 이루어지며 관개면적은 용덕저수지 261 ha, 미산저수지 199 ha이며 이동저수지는 3,426 ha인데 용수간선인 진위간선으로부터 급수되며 일부는 원암양수장(관개면적 51 ha)과 은산양수장(관개면적 1,102 ha)에서 양수되어 급수되고 있다.

시험지구의 농업수리시설 관리는 한국농촌공사 경기도본부 산하의 평택지사와 안성지사에서 담당하고 있으며 미산, 노곡저수지와 미산 관개지구는 안성지사(공도지소)에서 관할하고 그 이외의 지역은 평택지사(송탄지소)에서 관할하고 있다.

시험지구의 농업용수의 특성을 유역의 강우-유출특성, 주요 수원공 유입, 저류특성 그리고 평야부 관개특성으로 크게 구분하여 이에 따른 현장관측망 항목을 선정하였다. 농업용수 현장 관측항목은 강우량, 하천수위, 저수지 수위와 관개지구의 용·배수로 수위이며 이들 관측항목에 대해 각각의 관측기를 이동시험지구 현장에 적절하게 설치하여 농업용수 관측망을 설치, 운영하였다. 아래 (그림 3-9-1)은 이동시험지구의 관측 위치도를 나타내고 있다.



(그림 3-9-1) 농촌용수 종합시험지구 위치도 (이동지구)

(1) 수리시설현황

이동지구의 주요수리시설로는 용덕저수지, 미산저수지, 노곡저수지, 이동저수지 등 저수지 4개소와 원암양수장, 덕성양수장, 은산양수장 등 양수장 3개소가 있으며 평야부 관개면적은 2,063 ha이다. 저수지의 경우 4개의 저수지 중에서 이동저수지가 면적 및 저수량의 규모가 가장 크며 미산저수지는 제당의 높이에 비해 길이가 비교적 짧은 특징을 가지고 있다. 또한 미산저수지는 유역면적이 용덕저수지의 약 1/3임에 비해 유효저수량은 약 700,000 m³ 가 큰 특징이 있다. 양수장의 경우 이동저수지에 은산, 원암

양수장이 있으며, 관개면적은 은산양수장이 가장 규모가 크다. 상세한 주요수리시설물의 제원은 다음 <표 3-9-1>, <표 3-9-2>와 같으며, 규모가 가장 큰 이동저수지의 용수간·지선별 관개면적에 관한 제원은 <표 3-9-3>과 같다.

<표 3-9-1> 양수장 제원

양수장명	위 치	준공년도	관개면적	수원공	시설규모	
					HP×mm	대수
은 산	평택시 진위면 은산리	76	1,286 ha	이동저수지	50×250 700×850	1 3
원 암	용인시 남사면 원암리	71	47 ha	이동저수지	40×300	1
덕 성	용인시 이동면 덕성리	60	10 ha	용덕저수지	20×150	1

<표 3-9-2> 저수지 제원

구 분		저 수 지 명			
		이 동	용 덕	미 산	노 곡
면적 (ha)	유역	9,300	1,250	442	187
	관 개	2,063	261	199	20
저수량 (천 m ³)	유효저수량	17,200	1,003	1,698	228
	만 수 위	11.70	9.50	16.50	7.00
저수위 (m)	홍 수 위	14.19	10.50	19.00	7.90
	높 이	17.5	13.4	25.0	10
제 당 (m)	길 이	660	299	251	131
	여수토형식	텐터게이트	물넘이	물넘이	물넘이
기 타	위치(경기)	용인 이동	용인 이동	안성 양성	안성 양성
	관리기관	평택지사 송탄지소	평택지사 송탄지소	안성지사 공도지소	안성지사 공도지소

<표 3-9-3> 이동저수지 용수간·지선별 관개면적

구 분	용수간·지선	관개면적(ha)	비 고
계		2,063	
이동저수지	○ 진위용수간선	1,267	- 대상자료 : 용수로
	- 진위	183	
	- 방아지선(별도)	128	- 기록시기 : 급수기 (4월 1일 이후)
	- 남사지선	110	
	- 5호지선	309	원암양수장에서 급수 은산양수장에서 급수
	- 은산지선	94	
	- 원암지선	47	
	○ 진원용수간선	1,192	

(2) 물관리자료 현황

저수지와 양수장 별 물관리자료 현황은 강우량, 저수위, 급수량, 방류상황, 가동시간, 전동기 상태 등으로 자료를 관리하고 있다. 양수장의 경우 <표 3-9-4>와 같이 가동시간은 전일누계, 급수기별로 기록하고 있으며 전동기 상태에 따라 전압, 전류 등을 기록하고 있다. 또한 저수지의 경우 <표 3-9-5>와 같이 강우량은 강우발생 시, 저수위는 관개기 여부에 따라 비관개기 시 주1회, 관개기 시 일1회, 급수량은 취수

문 개폐 시, 방류량은 방류 시에 기록하고 있다.

<표 3-9-4> 양수장 가동시간, 전동기상태

구 분	기 록 시 기	관 리 자 료
가동시간	전일누계, 금일가동	양수기별 기록유지
전동기상태	전압,전류 등	양수기, 전동기, 제수변별 기록유지

<표 3-9-5> 저수지 강우량, 저수위, 급수량(간선수위로 대체), 방류상황

구 분	기 록 시 기	관 리 자 료
강우량	강우발생시	금일00:00~금일24:00 누계량
저수위	비관개기: 주1회 관 개 기: 일1회	07:00 현재저수위 (관개기 : 4월1일 이후)
급수량	취수문개폐시	하류 용수로 수위기록
방류량	방류시	개방문비수 및 개방시간

(3) 이동지구 특성

이동지구의 유역은 이동저수지의 상류유역으로 3개의 저수지 유역인 용덕유역과 미산유역, 노곡유역을 포함하고 있다. 각 유역의 토지이용, 토양특성, 수문특성 분석을 위해 이들 3개 소유역과 하류하천지점인 덕성교 지점 (용덕유역하류)과 재인교 지점(미산유역하류)에서의 유역유출 특성을 조사, 분석하였다. 유역의 구분은 1:25,000 수치지형도를 이용하여 수행하였으며 유역의 토지이용별 면적 및 토양특성 등을 구하였다. 유역면적은 이동유역이 9,300 ha로 가장 크고 미산유역이 442 ha로 가장 작으며 다양한 크기의 유역면적 분포를 보이고 있다. 유역의 토지이용 상태는 상류유역인 용덕과 미산유역은 산림이 90% 이상이며 이동유역은 산림이 73% 정도를 차지하고 논이 16%, 밭이 4% 그리고 기타 7% 정도로 구성되었다. 자세한 내용은 <표 3-9-6>과 같다.

<표 3-9-6> 이동지구의 특성

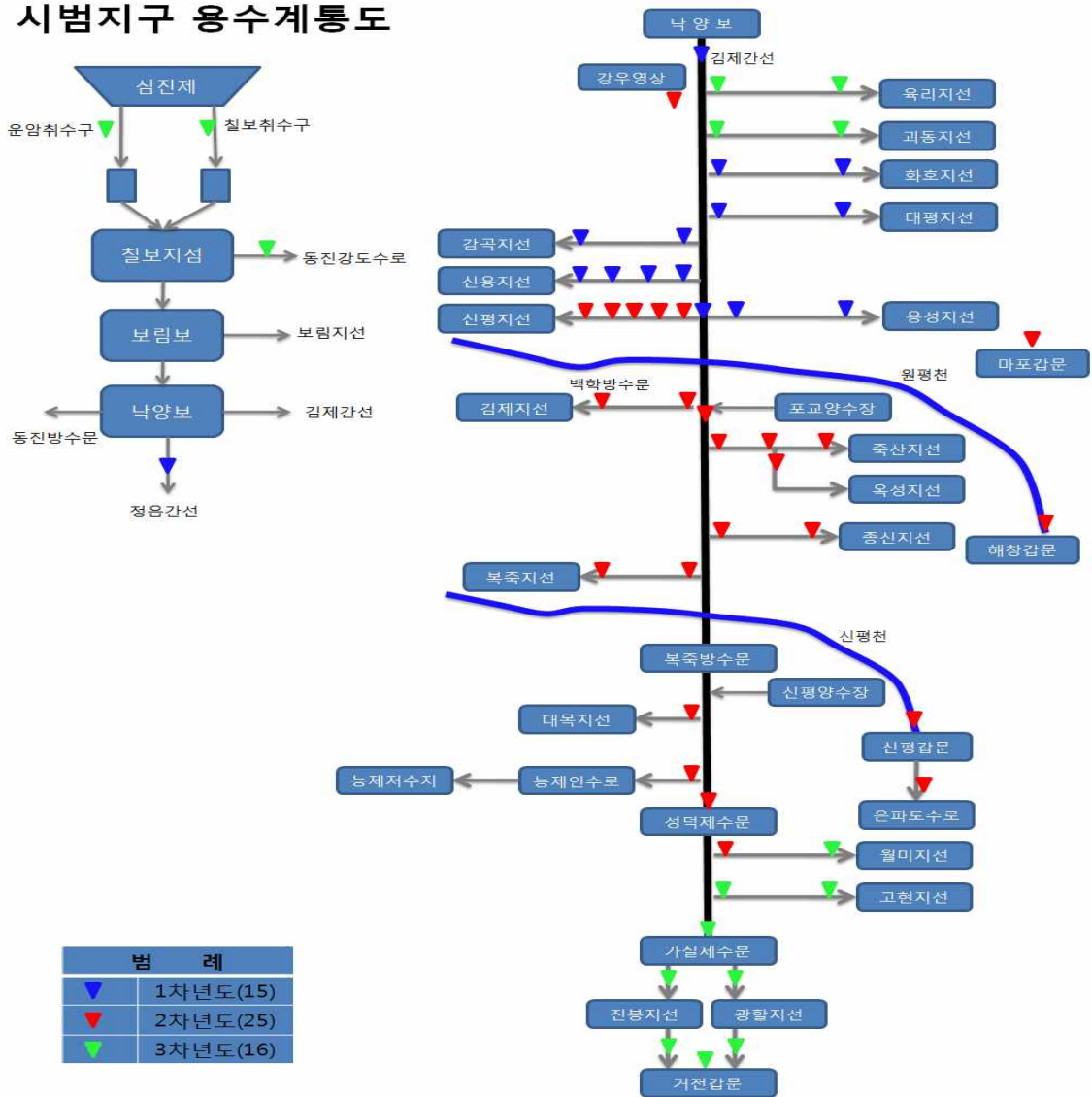
구 분	수문관측	유역면적 (ha)	토지이용 (ha)				비 고
			임야	논	밭	기타	
용 덕	저수위	1,241	1,132 (91.2%)	46 (3.7%)	24 (2.0%)	39 (3.1%)	
미 산	저수위	439	398 (90.7%)	- (-)	11 (2.5%)	30 (6.8%)	
이 동	저수위	9,440	6,859 (72.7%)	1,490 (15.8%)	371 (3.9%)	720 (7.6%)	
노 곡	저수위	186.7	142.6 (76.4%)	21.4 (11.5%)	11.8 (6.3%)	10.9 (5.9%)	
덕성교	하천수위	4,244	3,440 (81.0%)	505 (12.0%)	135 (3.0%)	164 (4.0%)	
재인교	하천수위	1,600	1,220 (76.0%)	238 (15.0%)	63 (4.0%)	79 (5.0%)	
미산유입	하천수위	262.4	235.0 (89.5%)	0.9 (0.3%)	6.0 (2.3%)	20.6 (7.8%)	
묵방교	하천수위	1112.8	984.0 (88.4%)	14.7 (1.3%)	94.7 (8.5%)	19.4 (1.7%)	

나. 동진지구

두 번째 시범지구로 선정된 동진지구는 섬진강 수계의 섬진제를 수원공으로 하고 있

으며, 수혜지구는 정읍시, 김제시, 부안군으로 섬진제의 운암취수구, 칠보취수구를 이용하여 용수를 공급하고 있다. 동진지구는 전라북도 김제시 일원(동진지사 김제간선)에 위치하고 낙양보에서 김제간선으로 시작하여 광활, 진봉지선까지 총 59 km의 간선수로 되어있으며 섬진제 유역면적은 76,300 ha, 수혜면적은 33,177 ha이다. 시범지구 수원공인 낙양보는 전북 정읍시 태인면 낙양리에 위치하고 있으며 수혜면적은 17,600 ha이다. 낙양보는 김제간선과 정읍간선으로 나뉘어 있으며 김제간선의 수혜면적이 대부분을 차지한다. 다음 (그림 3-9-2)는 섬진제 용수계통도, <표 3-9-7>은 낙양보 수리 시설물 현황, <표 3-9-8>은 섬진제 용수공급량 현황을 나타낸다.

시범지구 용수계통도



(그림 3-9-2) 섬진제 용수계통도

<표 3-9-7> 낙양보 수리시설물 현황

시설물명	수혜면적 (ha)	계획통수량 (m ³ /sec)	연장 (km)	폭 (m)	고 (m)	비 고
계	17,600	25.0	81			B×H×년
김제간선	16,567	20.0	59	22.0	2.50	9.4×3.2×2
정읍간선	1,033	5.0	22	5.0	1.80	9.4×3.2×1

<표 3-9-8> 섬진제 용수공급량 현황

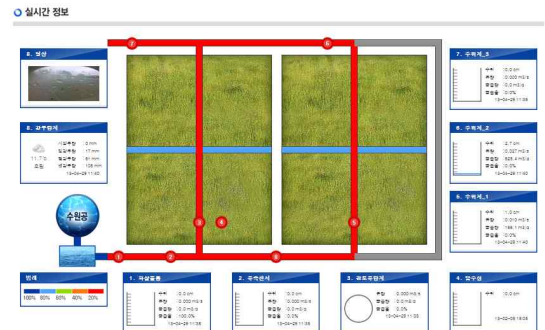
구 분		계	평균	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
섬진강댐	계	2,355,804	471,161	472,529	479,206	538,222	323,810	542,037
	운암취수구	513,652	102,730	90,314	87,334	110,459	109,660	115,885
	칠보발전소	1,695,156	339,031	356,141	365,644	396,140	182,613	394,617
	본댐(섬진강)	146,996	9,399	26,074	26,228	31,622	31,536	31,536
이용량	계	1,720,966	44,193	298,581	403,523	381,939	247,442	389,481
	도수로	749,284	149,857	128,016	170,165	158,458	109,650	182,995
	김제간선	818,740	163,748	143,185	192,534	187,107	110,881	185,033
	정읍간선	152,943	30,589	27,381	40,824	6,374	6,911	1,453
동진강	방류수	507,975	101,595	147,874	7,516	132,124	5,889	124,571
강우량(정읍지역)		6,637	1,327	1,253	1,566	889	1,237	1,693

다. 연구원 시험포장

세 번째 시범지구로 선정한 농어촌연구원 시험포장은 경기도 안산시에 위치하고 있으며 면적은 약 1,000 m², 300 평 규모로 용수지선 1조, 용수지거 2조, 배수로 1조의 수로로 포장시설이 갖춰져 있다. 계측시설로는 강우·영상계 1개소와 수위계 3개소(초음파수위계), 유량계 3개소(과살플럼, 전자유속계, 관로형 유량계)가 있다. 본 시험포장은 다양한 현장에서 활용 가능한 계측기기를 이용하여 농촌용수의 공급량과 방류량 정보 계측이 가능하다. (그림 3-9-3)은 연구원 시험포장에 대한 정보를 나타내고 있다.



(a) 연구원 시험포장 모식도



(b) 연구원 시험포장 계측정보

(그림 3-9-3) 연구원 시험포장 정보

2.2 해외 시험지구

본 연구과제에서 개발한 농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술은 농촌유역 물환경 관련 원천기술 개발에 따른 관련분야 기술력의 수월성 확보를 통한 세계적인 기술력을 선점하고자 하며, 국내 순수 기술에 의한 물순환 해석 소프트웨어 기술 기반 구축을 통한 글로벌 실용화를 위해 해외 시험지구 적용에 대한 가능성을 검토해보고자 한다. 이를 위해 농업부문의 국제적 교류가 활발하고 우리나라의 기후 및 농업환경이 다른 우즈베키스탄을 해외 시험지구로 선정하여 현황 및 관련자료를 수집·분석하였다.

가. 해외 시험지구 일반 현황

우즈베키스탄은 (그림 3-9-4)와 같이 중앙아시아의 중앙에 동서로 펼쳐져 있으며, 동경 56°~73°, 북위 37°~46° 사이에 위치하고 있다. 국토면적은 447,400km²으로 41,424천 ha가 육지이며, 나머지 3,366천 ha는 내륙의 바다인 아랄해 등이 차지하고 있다. 국토의 약 79%는 중앙아시아에서 가장 큰 사막인 Kyzyl Kum사막을 포함하는 저지대의 사막 또는 평원으로 구성되어 있다. 서부지역과 중부지역이 여기에 해당된다. 동북부에 있는 Fergana Valley는 우즈베키스탄에서 가장 비옥한 곳으로 넓이는 21,440km²이며, 우즈베키스탄, 키르기스스탄, 타지키스탄이 공유하고 있다. Fergana Valley의 연평균강수량은 100~300mm이지만 수로가 개발되어 벨리의 가장자리와 중앙의 일부만 사막지역으로 남아있다.



(그림 3-9-4) 우즈베키스탄 행정구역도

우즈베키스탄의 주요 강에는 Amu Darya 강과 Syr Darta 강이 있다. Amu Darya 강

은 타지키스탄에서 발원하여 우즈베키스탄과 투르크메니스탄을 지나 아랄 해로 유입되며, Syr Darta 강은 키르기스스탄에서 발원하여 우즈베키스탄과 카자흐스탄을 지나 아랄 해로 유입된다. 이 두 강 사이에 대부분의 국토가 존재하므로 주요한 수원이다.

우즈베키스탄은 사막형 대륙성 기후를 나타내며, 기온의 계절 및 일별 차이가 심하다. 여름은 길고 무덥고 건조하며, 5월 중하순부터 8월 하순까지 무더위가 지속된다. 봄은 습하고 겨울은 따뜻하지만 변화무쌍한 특징을 나타낸다. 7월의 평균기온은 27~30℃이고, 최고 기온은 45~47℃에 이른다. 1월의 평균기온은 -1~-8℃이고, 최저 기온은 Ustyurt 고원에서 -38℃에 이르는 바가 있다. 주요 농업지대인 안디잔 지역의 1월 평균온도는 -1.3℃, 7월 평균온도는 27.5℃ 정도이다. 여름철은 다소 길어 5월 중하순부터 8월 하순까지 무더위가 지속된다.

강수량은 12월~4월에 집중되고 지역별 차이가 크다. 작물 재배지역에서는 100~400mm를 나타내며, 초원에서는 80~200mm, 구릉지역은 300~400mm, 산등선의 동부와 남동부의 경사면에는 600~800mm 가량이다. 적은 강수량으로 인해서 농업용수가 부족하며, 부족분은 겨울철에 집중되는 강설을 저수지에 저류하여 충당한다. 여름철에는 적은 강수량, 낮은 습도, 적은 구름 등으로 인해서 일사량이 800~1,000Mj/m²이며, 일조시간은 남부지방 2,800~3,130시간, 북부지방은 2,700~2,980시간으로서 유럽 국가들보다 25~40% 정도 많다(한국농어촌공사, 2009c).

전반적으로 우즈베키스탄 지역의 지향사(Geosyncline)지층은 고생대(2억년 전)에 형성되었다. 이후로는 지질형성 작용이 없다가 신생대 제 3기부터 강한 지각 움직임이 있는데 이에 의해 우즈베키스탄 동쪽의 고산지대가 형성되었다. 동부의 고산지대인 천산산맥은 데본기와 석탄기의 붉고 탄화된 암이 지질작용을 받아 굴곡이 만들어졌는데 북서부 주향의 습곡이 형성되었다. 중생대 단층지대의 복잡하게 굽은 지층구조는 석탄기와 페름기의 화산석, 데본기의 석회석과 수많은 화강섬록관입암으로 구성되어 있다. 우즈베키스탄의 많은 산간지역은 지진활동에 의한 것인데 페르가나 산간유역은 중생대와 신생대지층으로 구성되어 있다. 우랄알타이판은 깊은 단층으로 싸여 여러 개의 고원을 이루고 있다. 우랄알타이판의 지하부는 5억년보다 더 이전에 형성된 선캄브리아기의 편암으로 구성되어 있다. 지층의 많은 부분인 침전층은 육성이고 탄소질이며 염분을 포함하고 있는 퇴적층이다. 남쪽 Tian Shan의 깊은 단층에 의해 형성된 깊은 골짜기에는 석탄기의 화산에 의해 침전된 퇴적이 화강암의 관입과 함께 일어났다.

우즈베키스탄에는 다양한 광물들이 풍부하다. 비스무트(Bi) 광석의 퇴적이 천산지역의 마그마의 형성과 관련이 되어 있으며 구리반암의 최적은 섬록암과 연결되어 있고 복합광물은 탄산암과 관련이 있고 금의 축적은 화산의 발생과 연결되어 있다. 또한 금의 축적은 Kyzylkum의 선캄브리아기의 바위와 관련이 되어 있으며 석유는 페르가나 계곡지역에서 나온다. 또한 텅스텐, 석탄, 칼륨, 역암, 황, 흑연, 보석 등이 매장되어 있는 것으로 알려져 있다.

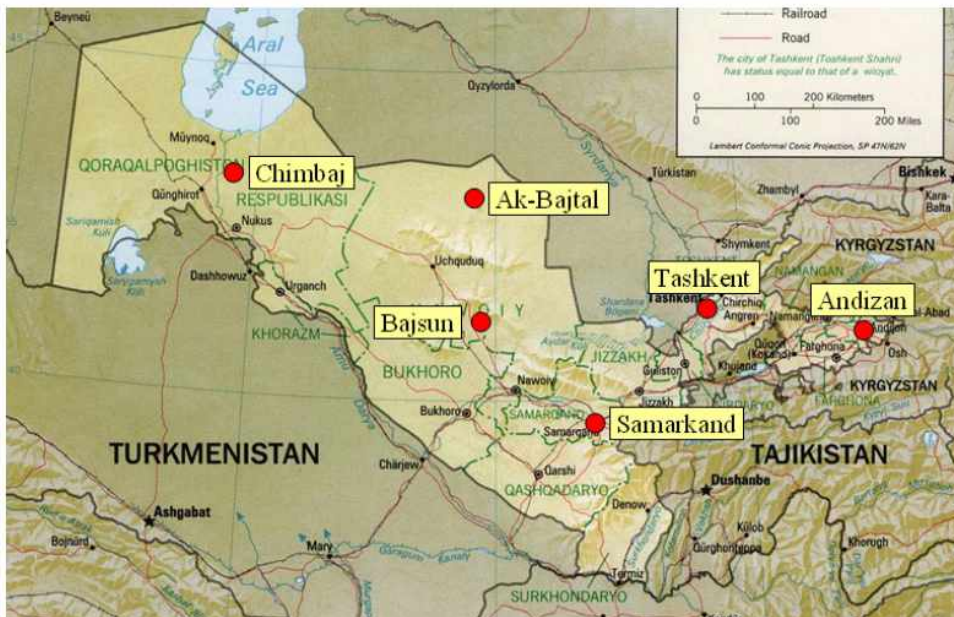
나. 기상 현황

우즈베키스탄의 기상 특성을 분석하기 위하여 (그림 3-9-5)와 <표 3-9-9>에 나타난 것과 같은 6개의 기상관측소 자료를 분석하였다. 기상관측소는 북위 39°~43° 사이, 동

경 59°~72° 사이에 분포하고 있다. 본 연구에서는 우즈베키스탄의 기상 특성을 지형과 관련해서 파악하기 위하여 기상관측소의 위치를 고려하여 주요 관측소를 선정하였다.

<표 3-9-9> 주요 기상관측소 개황

위치	위도	경도	고도(EL. m)
AK-Bajtal	43°09' N	64°20' E	234
Andizan	40°44' N	72°20' E	477
Bajsun	41°22' N	64°30' E	320
Chimbaj	42°57' N	59°49' E	66
Samarkand	39°34' N	66°57' E	724
Tashkent	41°16' N	69°16' E	488



(그림 3-9-5) 주요 기상관측소 위치

<표 3-9-10>~<표 3-9-12>는 6개 기상관측소의 월별 평균기온, 최대기온, 최소기온을 나타낸 것이다. 평균기온은 북부지역인 AK-Bajtal과 Chimbaj 관측소가 12.0℃, 11.0℃로 가장 낮으며 남쪽지역인 Tashkent와 Andizan 관측소가 14.2℃, 13.6℃로 가장 높다. 우즈베키스탄 전체의 연평균기온은 12.9℃ 정도이다. 계절별 기온차는 농업이 주로 이뤄지고 있는 Bajsun과 Samarkand 관측소가 위치한 지역의 여름철과 겨울철 기온차가 23.9℃, 25.6℃로 가장 적었으며 사막평야지대이면서 북부지역인 AK-Bajtal과 Chimbaj 관측소가 위치한 지역의 여름철과 겨울철의 기온차가 각각 35.7℃, 32.9℃로 가장 컸다.

월평균 최대기온은 1월 평균 2.7℃로 가장 낮으며 7월이 35.1℃로 가장 높았다. 7월의 최대기온은 사막지역인 AK-Bajtal이 위치한 지역이 가장 높았으며 산간지역인 Andizan이 위치한 지역이 가장 낮았다. 월평균 최저기온은 1월이 -5.1℃로 가장 낮았

으며 7월이 19.3℃로 가장 높았다. 1월 평균 최저기온은 사막지역인 AK-Bajtal이 위치한 지역이 가장 낮은 -10.2℃이며 다음으로는 산간지역인 Andizan이 위치한 지역이 -5.8℃로 낮게 나타났다. 다른 지역의 경우 -3.0℃~-3.3℃로 큰 차이가 없었다.

우즈베키스탄의 중북부의 사막 및 평야지대에서의 기온은 일교차 및 계절적 차이가 심하며 농사가 많이 이뤄지고 있는 남부지역의 경우 일교차 및 계절차가 적은 편이다. 또한 여름철 7~8월 월평균 최대기온은 32℃이상으로 일 최대기온은 40℃를 넘는 날이 많다.

<표 3-9-10> 주요관측소의 월평균기온

관측소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
AK-Bajtal	-6.0	-4.2	4.1	13.9	21.2	27.0	29.7	26.6	20.0	10.5	3.4	-2.8	12.0
Andizan	-1.9	0.9	8.4	16.4	21.7	26.2	27.2	24.7	19.6	12.8	6.0	0.7	13.6
Bajsun	1.3	2.3	7.2	13.1	17.9	23.2	25.2	23.5	18.4	12.3	7.6	3.9	13.0
Chimbaj	-5.6	-4.5	2.9	12.9	20.5	25.2	27.3	24.5	18.1	9.8	3.5	-2.3	11.0
Samarkand	0.6	2.2	7.8	14.5	19.5	24.5	26.2	24.2	19.3	12.7	7.5	3.3	13.5
Tashkent	0.5	2.4	8.6	15.4	20.4	25.6	27.6	25.4	20.1	13.3	7.8	3.2	14.2
평균	-1.9	-0.2	6.5	14.4	20.2	25.3	27.2	24.8	19.3	11.9	6.0	1.0	12.9

<표 3-9-11> 주요관측소의 월평균 최대기온

관측소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
AK-Bajtal	-0.9	1.4	10.5	20.7	28.6	34.1	36.4	33.8	27.5	17.5	9.4	1.6	18.4
Andizan	3.2	6.3	14.6	23.2	28.7	33.8	34.7	32.6	28.5	21.3	13.0	5.6	20.5
Bajsun	-0.4	1.7	10.0	20.7	28.3	33.1	35.0	32.5	26.8	17.8	9.9	2.4	18.2
Samarkand	6.1	7.9	13.5	20.8	26.4	32.0	33.8	32.2	27.9	21.0	14.9	9.2	20.5
Tashkent	5.7	7.8	14.3	21.8	27.3	33.2	35.6	34.0	28.7	20.9	14.1	8.6	21.0
평균	2.7	5.0	12.6	21.4	27.9	33.2	35.1	33.0	27.9	19.7	12.3	5.5	19.7

<표 3-9-12> 주요관측소의 월평균 최저기온

관측소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
AK-Bajtal	-10.2	-8.3	-0.6	7.7	14.0	19.3	22.2	19.1	12.8	4.5	-1.2	-6.3	6.1
Andizan	-5.8	-3.3	3.3	10.2	14.8	18.3	19.5	17.1	11.9	6.3	0.9	-2.8	7.5
Bajsun	-3.0	-1.9	2.9	7.9	11.7	15.8	17.6	15.7	11.2	6.3	2.6	-0.2	7.2
Samarkand	-3.3	-1.4	3.2	8.9	12.7	16.4	17.8	15.9	11.2	6.0	2.0	-0.9	7.4
Tashkent	-3.1	-1.5	4.2	9.9	13.7	17.7	19.4	17.2	12.4	7.3	3.4	-0.3	8.4
평균	-5.1	-3.3	2.6	8.9	13.4	17.5	19.3	17.0	11.9	6.1	1.5	-2.1	7.3

6개 기상관측소의 월별 평균 강수량은 <표 3-9-13>과 같다. 사막 및 스텝지역에 해당되는 AK-Bajtal, Bajsun, Chimbaj 관측소의 평균 강수량은 각각 119.0mm, 125.0mm, 141.6mm 로 가장 비가 적게 내리는 지역이다. 남부 및 동부 산간지역에 속하는 Samarkand, Tashkent 관측소의 평균 강수량은 각각 355.0mm, 420.0mm로 높게 나타났다.

월별 강수량의 분포를 보면 5월말부터 9월중순 사이에는 거의 비가 오지 않는 기간으로 6월부터 9월 사이에 월평균강수량이 5mm이하의 적은 강수량을 보인다. 대부분의 강우는 12월부터 4월 사이에 발생하며, 이 기간 중에 발생하는 강우는 지역별 편차가 심하다. 6개의 기상관측소 중 가장 많은 강우량을 보이는 Tashkent 관측소는 가장 적게 강우량이 발생하는 Bajsun 관측소에 비하여 3.8배 많은 강우량이 발생했다.

여름철에 강우가 적고 겨울과 봄에 강우가 집중되는 강우 패턴에 가장 적합한 품종은 목화였으며, 소비에트연방시절부터 목화 재배단지로서 농업이 발달하였다. 그러나 최근 기상이변으로 인하여 2009년의 경우 5월말까지 비가 내려 파종한 목화씨가 썩어 여러 번 파종을 하였다. 그러나 최근 들어 중앙아시아에서의 강우는 점차 줄어들고 있는 상황이므로 이러한 5월말의 강우는 전체적인 강우량의 증가를 의미하는 것이 아니라 강우의 발생이 기존의 패턴과 다르게 변하고 있다는 것을 의미한다.

<표 3-9-13> 주요 관측소의 월평균 강수량

관측소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
AK-Bajtal	10.0	12.0	17.0	22.0	12.0	3.0	4.0	2.0	2.0	7.0	11.0	17.0	119.0
Andizan	26.0	33.0	37.0	28.0	21.0	8.0	6.0	2.0	4.0	26.0	22.0	25.0	238.0
Bajsun	13.0	10.0	19.0	22.0	14.0	4.0	4.0	3.0	3.0	10.0	10.0	13.0	125.0
Chimbaj	16.2	12.4	21.1	22.9	15.0	3.9	3.5	2.5	2.8	12.5	11.6	17.2	141.6
Samarkand	44.0	39.0	71.0	63.0	33.0	4.0	4.0	0.0	4.0	24.0	28.0	41.0	355.0
Tashkent	55.0	47.0	72.0	64.0	32.0	7.0	4.0	2.0	5.0	34.0	45.0	53.0	420.0
평균	27.4	25.6	39.5	37.0	21.2	5.0	4.3	1.9	3.5	18.9	21.3	27.7	233.1

<표 3-9-14>는 Tashkent 관측소의 월별 일조시간의 일평균 값 및 월별 합계를 나타낸 것이다. Tashkent 관측소의 연간 일조시간은 2,833시간이었다. 우즈베키스탄의 연간 일조시간은 2,700~3,130시간으로 맑은 날이 300일 이상 계속되는 것으로 측정되고 있다. 이는 서울의 일조시간이 2,170시간인데 비하여 약 500~1,000시간 더 길다. 건조한 날씨에 많은 일조량으로 우즈베키스탄의 과실은 당도가 높고 품질이 좋은 것으로 평가받고 있다.

<표 3-9-14> Tashkent 관측소의 월별 일조시간

일조시간	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
월평균	3	5	5	8	9	12	13	12	10	8	5	3
월별 합계	93	140	155	240	279	360	403	372	300	248	150	93

<표 3-9-15>는 5개 주요 기상관측소의 상대습도를 나타낸 것이다. 전체 평균 상대습도는 57%이며, 12월이 77.2%로 가장 높으며 6월이 41%로 가장 낮다. 강우가 주로 발생하며 기온이 낮은 겨울철의 상대습도가 여름철에 비하여 높게 나타난다.

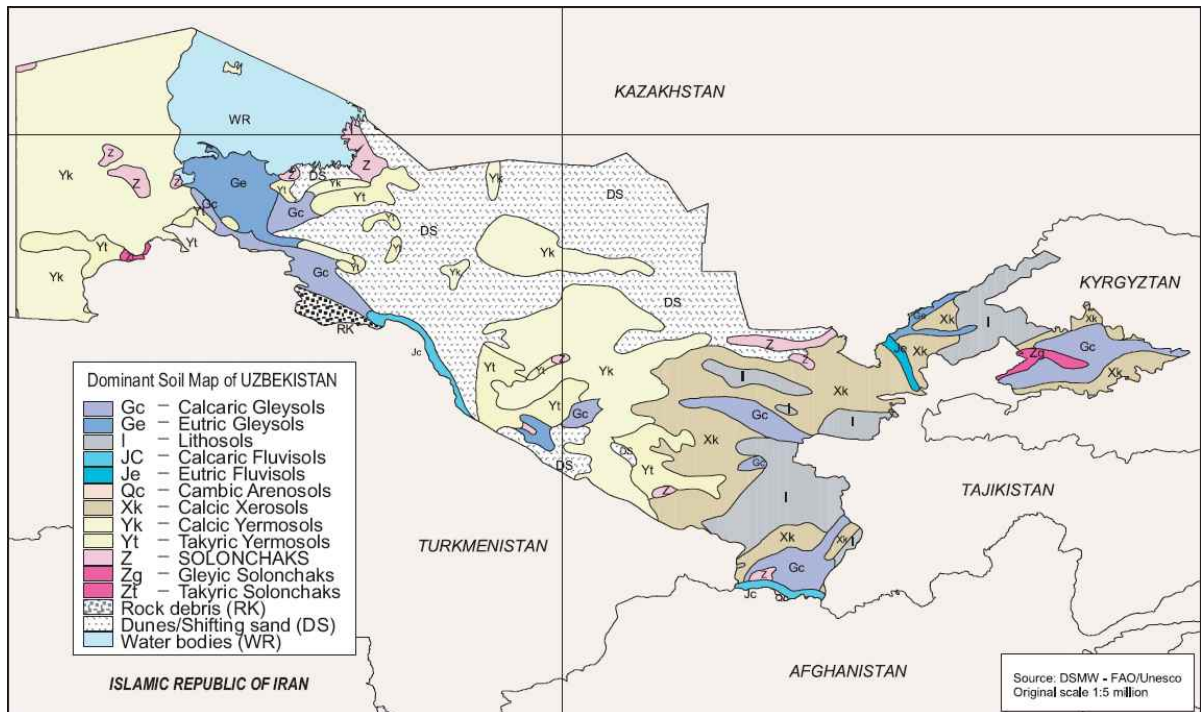
<표 3-9-15> 주요관측소의 월평균 상대습도(%)

관측소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
AK-Bajtal	80	76	65	49	38	29	30	31	35	50	67	80	53
Andizan	84	81	72	62	54	46	50	57	60	68	77	86	66
Bajsun	77	73	67	57	49	47	48	51	54	59	69	77	61
Samarkand	73	73	70	64	53	42	42	42	47	59	66	72	59
Tashkent	70	68	63	60	53	41	40	43	46	58	66	71	57

다. 토양

(그림 3-9-6)은 우즈베키스탄 전체에 대한 토양분포도를 나타낸 것이다. 토양의 분류는 FAO토양분류에 따른 자료이다. <표 3-9-16>은 토양분포도를 이용하여 각 토양분류별 면적을 산정한 결과를 나타낸 것이다.

<표 3-9-16>~<표 3-9-17>은 우즈베키스탄에 있는 토양들에 대한 개략적인 설명을 정리하였다. 전체 국토면적의 47.1%가 표층에 칼슘층을 가지고 있는 것으로 조사되었는데 이는 칼슘에 의해 토양이 알카리성질을 띠게 되며 이러한 토양의 영향으로 하천수 역시 알카리성을 띠게 된다. 따라서 우즈베키스탄에서의 농업을 실시할 때 이러한 것을 충분히 검토하여 작물을 선택하여야 하며 또한 영농방법 및 비료의 선택에 고려되어야 한다. 또한 유기물 공급 방법과 미량요소(철분, 붕소, 망간, 몰리브덴, 아연 등)과 마그네슘, 유황의 공급이 필요하다.



(그림 3-9-6) 지역별 토양 분포도

<표 3-9-16> 토양별 면적(FAO 토양분류)

기호	설명	면적	
		(1,000ha)	%
Gc	Calcaric Gleysols	3,064.9	6.9%
Ge	Eutric Gleysols	1,349.6	3.0%
I	Lithosols	3,395.1	7.5%
Jc	Calcaric Fluvisols	478.8	1.1%
Xk	Calcic Xerosols	5,531.3	12.4%
Yk	Calcic Yermosols	11,938.8	26.7%
Yt	Takyric Yermosols	2,705.1	6.0%
Z	SOLOCHAKS	949.7	2.1%
Zg	Gleyic Solonchks	189.3	0.4%
Zt	Takyric Solonchaks	27.4	0.1%
RK	Rock debris	344.7	0.8%
DS	Dunes/Shifting Sand	11,311.3	25.3%
WR	Water Bodies	3,454.0	7.7%
합계		44,740	100%

<표 3-9-17> 토양별 특성

구분	기호	토양특성	문제점
Gleysols* (회색화토)		-배수가 되지 않으면 장시간동안 지하수에 의해 포화되는 습지토양, A층, H층, cambic B층(수산화철 유리, 규산염 점토 생성 및 부식 집적층), calcic층(칼슘, 마그네슘등 탄산염 집적층) 혹은 gypsum층(석고가 집적된 층) 외에 다른 감식층위가 없는 토양 -토색 무늬는 토피내부나 하부에 있는 회색/청색과 결합되어, 토피 표면 혹은 상부 토층에 적색, 갈색 혹은 황색으로 이루어져 있음	
Calcaric Gleysols (탄산염 회색화토)	Gc	-표면으로부터 125cm이내에 calcic층 혹은 gypsum층이 있거나, 최소한 20~50cm사이에 탄산염 물질이 있음	배수불량 높은경도
Eutric Gleysols (염기포화 회색화토)	Ge	-표면으로부터 20~100cm 혹은 20cm와 연속적 암석이나 경화층 사이의 주요부분에서 염기 포화도가 50%이상인 Gleysols	배수불량 높은경도
◦ Lithosols* (암석토)	I	-연속적인 암석위에 있는 토심이 매우 얇은 토양으로서 자갈이 아주 많거나 돌이 있음(부피기준 세토가 20%미만) -비성대토양, 특히 산악지역에 일반적임 -산악지역에서의 침식 및 과도한 내부 배수, 얇은 토심으로 인한 한발 우려	얇은작토 낮은 수분함량
◦ Fluvisols* (충적토)		-발생적으로 젊은 비성대 토양이며 충적토로서 강, 호수, 바다에서 퇴적되며, ochric(유기질이 적은 담색의 광질표층)혹은 umbric A층(두꺼운 암색 광질 표층), H층(유기물 집적층) 혹은 sulfuric층(황 집적층)외에 감식층위가 없음 -자연조건에서 주기적으로 침수되는 토양 -많은 건조지에서 작물이 성장할 수 있으며 물관리를 통해 정상적으로 성장가능	
Calcaric Fluvisols (탄산염 충적토)	Jc	-표면으로부터 20~50cm 혹은 20cm와 연속적 암석이나 경화층 사이에 탄산염 물질은 가지고 있는 Fluvisols	침수 높은경도

<표 3-9-17> 토양별 특성(계속)

구분	기호	토양특성	문제점
Xerosols** (건조토)		-약한 ochric A층과 건조 수분상태를 가지고 있으며 표토로부터 200cm이내에 영구동결층이 없음	
Calcic Xerosols (석회질 건조토)	Xk	-표층으로부터 125cm이내에 calcic층을 가지고 있는 Xerosols	수분부족 높은경도
YERMOSOLS ** (사막토)	Y	-매우 약한 ochric A층과 건조 수분상태를 가지고 있으며 표토로부터 200cm이내에 영구동결층이 없음	수분부족
Takyric Yermosols (불모화 사막토)	Yt	-takyric 특성(중토성 표층, 표층 지각 구성, 하부에 판상구조, 건조조건하에서 주기적으로 침수되는 토양에서 발생)을 나타내는 Yermosols	수분부족 침수 높은경도
Calcic Yermosols (석회질 사막토)	Yk	- 표층으로부터 125cm이내에 calcic층을 가지고 있는 Yermosols	수분부족 높은경도
SOLONCHAK S** (알카리백토)	Z	-염도가 높고 A층, H층, cambic B층, calcic층 혹은 gypsic층 외에 다른 감식층위가 없는 토양 -지하수가 낮게 위치하여 지표면에서는 염분의 집적이 강하게 일어남.	염해 높은경도
Gleyic Solonchaks (회색화 알카리백토)	Zg	-표토로부터 50cm이내에 물에 의해 영향을 받은 특성을 나타내는 Solonchaks	염해 침수 높은경도
Takyric Solonchaks (불모화 알카리백토)	Zt	-takyric 특성을 나타내는 Solonchaks	염해 침수 높은경도

*: FAO World reference base for soil resources 2006, WRB Homepage: Extract from "Legend of the soil Map of the World", 1974, UNESCO, Paris

** : WRB Homepage: Extract from "Legend of the soil Map of the World", 1974, UNESCO, Paris

라. 농업현황

우즈베키스탄의 전체 인구는 2008년 현재 2,730만 명이며, 농촌인구가 62.7%를 차지하고 있다. 2007년 현재 농업생산은 GDP의 22% 정도이며, 과거 보다 낮아지고 있으며, 농업에 종사하는 인구는 전체 노동인구의 28% 정도를 차지한다. 농경지는 국토면적의 9% 정도인 4,050천 ha이며, 농업생산성을 제고하기 위하여 1993년부터 국가소유 농장을 개인농장화하고 있으나 진행률이 낮은 상태이다.

농작물 재배면적은 2007년 현재 3,560천 ha 정도이며, 관개농지가 50% 정도를 차지한다. 주요작물별 재배면적은 밀, 벼, 옥수수, 두류 등 곡물류 1,538천 ha, 목화 1,451천 ha, 감자 56천 ha, 채소 160천 ha, 메론 39천 ha, 사료작물 290천 ha 등이다. 우즈베키스탄에서는 목화와 밀은 전략적 작물이다. 특히 목화는 수출로 외화를 획득하고 있으며, 밀은 식량자급을 위하여 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 2008년 목화 재배 목표표로 재배면적은 1,391천 ha, 생산량은 3,600천 톤이다. 국가에서는 계획재배면적을 지역별로 할당하고, 목표달성을 독려하기 때문에 실제 재배면적이나 생산량은 목표량을 상회한다. 밀은 목화, 채소 및 사료작물 등을 대체하면서 재배면적이 2배 이상 증가하였다. 밀의 평균수량은 4.23톤/ha으로 최근에 많이 높아졌지만 생산성이 낮다. 곡류 및 두류는 국내 자급을 목표로 하고 있으며, 밀은 3,127천 톤, 논벼는 178천 톤, 옥수수는

118천 톤, 과수는 1,576천 톤, 채소는 4,098천 톤을 생산하였다. 과일과 채소는 최근 들어 우즈베키스탄의 주요 수출 품목으로 부상하고 있으며, 연평균 5,000천 톤을 생산해 50% 정도는 국내에서 소비되고, 나머지는 주변 국가들에 수출하고 있다.

우즈베키스탄 농업의 문제점의 하나는 겨울철에 맥류수확 후 짚을 대부분 가축사료로 사용하여 토양 유기물이 부족하고 대체로 토양비옥도가 낮다는 것이다. 따라서 부족한 질소성분을 공급하여 토양비옥도를 향상시키기 위하여 두과작물의 질소고정 근류균을 활용하고 있다. 또한 수리가 안전한 관개농지가 재배면적의 50%정도이고, 포장 면적이 대규모이며, 대형 농기계가 보급되었으나, 최근 정부예산 부족으로 관개시설 및 농기계의 유지관리가 어렵고 장비 및 시설들이 노후화되었다.

마. 관개배수

우즈베키스탄에서는 Amu Darya 강과 Syr Darya 강이 주요한 수원이며, 물수요의 80%를 공급한다. 중부지역에 위치한 Zrafshan 강과 Surkhandarya 강은 유량이 많지 않으나, 중부지역 농업용수의 주요한 수원이다. 중북부지역의 Djizak과 Navoi 사이에 위치한 Aydar-Arnasay 인공호수는 홍수조절용이며 염분이 많이 함유되어 농업용수로 잘 이용되지 않고 있다. 우즈베키스탄의 연간 물 사용량은 62~65km³이나 중앙아시아 국가간 수자원조정위원회(Interstate Coordination Water Commission)에 의하여 매년 Amu Darya 강과 Syr Darya 강으로부터 41km³의 물을 이용하도록 되어 있어, 부족한 물은 중소하천이나 지하수를 개발하여 이용한다. 또한 불균등한 수자원 분포를 해결하기 위하여 대규모의 운하가 건설되어 운영되어 왔으며, 강에서 멀리 떨어진 곳까지 관개용수를 공급하고 있다.

수자원의 용도별 상태를 살펴보면, 음용수 4.0%, 산업용 2.2%, 수산업 1.3%, 농업용 91.6%, 기타 0.9%로서 대부분이 관개목적으로 이용된다. 관개효율이 40% 정도로 매우 낮으며, 과도한 지하수 개발로 인한 토양의 염분집적은 심각한 문제를 야기하고 있다. 관개는 주로 고랑관개를 적용하고 있으며, Amu Darya 강과 Syr Darya 강 관개면적의 97.4 %인 340.3천 ha에 고랑관개가 적용되고 있다. 또한 스프링클러 관개가 5천 ha, 점적관개가 3.9천 ha를 차지하고 있다. 고랑관개는 스프링클러나 점적관개에 비해 관개효율이 낮으며, 평균효율은 65% 정도 이다.

우즈베키스탄에서는 1960년 이래 관개면적의 40~60%가 목화재배에 이용되었다. 그러나 목화는 물, 화학비료 및 농약 사용이 많이 요구되는 작물이기 때문에 관개용수 취수로 인해 아랄해의 사막화, 관개수 및 토양의 오염, 토양 염분집적 등의 문제가 발생하고 있다. 이와 같은 문제점들과 곡물증산 정책의 영향으로 점차 목화 재배면적이 줄어들고 있다. 따라서 관개수량을 줄일 수 있는 관개방법 연구가 최근 활발히 추진되고 있으며, 목화재배에 점적관개를 적용하여 관개수량을 32~38% 정도 줄이고, 면화수량을 21~22% 증수하는 관개방법이 개발되고 있다.

3. 시험지구 물순환 모니터링 및 자료 품질평가

시험구역의 현장 관측망을 통해서 수집된 현장자료의 처리는 전문적, 수문학적 기술에 근거하여 실시되어야 한다. 시험구역에서의 현장자료 수집과 분석은 현장관측기기

들에 의한 감지, 기록, 전송, 변환 등의 절차와 조사 분석자들에 의한 자료의 편집, 저장, 검색, 활용 등 일련의 체계적이고 단계적인 절차를 거쳐서 이루어진다.

시험유역 관측자료는 계측기가 자연현상의 강도를 신호로 변경하는 감지 (sensing), 신호를 디지털 출력하는 기록 (recording), 신호기록을 노트북과 근거리통신 (zigbee), CDMA 등에 의해 전산장비로 전송하는 전송 (transmitting)과정을 거쳐서 전산파일로 생성되었다. 그리고 생성된 현장 관측자료 파일은 데이터를 출력하여 야장 및 관리일지 등의 자료와 대조해서 오차와 여분의 정보를 제거하는 편집(editing)과정, 편집된 자료를 컴퓨터저장 매체에 보관하는 저장 (storage)과정, 분석을 위해 자료가 다양한 형태로의 추출 (retrieval)의 과정으로 처리되었다.

시험유역의 현장자료 저장은 강우량의 경우는 강우량 0.2mm 상승 시 이루어지며 수위 자료의 경우는 10분 간격으로 이루어지고 있다. 현장 관측기기에 의해서 관측된 자료는 자체기기별 형태로 파일이 생성되며 이를 변환 프로그램으로 텍스트 혹은 엑셀형식 파일로 변환하여 분석에 활용하였다. 저수지의 경우, 서버로 자료를 송신하여 현장에서 자료를 수집하지 않고도 서버 컴퓨터에서 자료를 다운받아 분석할 수 있게 하였다. 이와 같은 방법으로 시험지구의 강우자료, 저수지 수위자료의 모니터링을 수행하였다.

본 절에서는 농촌용수 물순환 종합해석 모형 개발을 위한 데이터를 제공하기 위해 시험지구의 물순환 모니터링을 수행하였다. 물순환 모니터링을 수행함과 동시에 본 연구에서는 시험지구 중 이동지구는 수문 및 농업용수 관련자료의 품질을 확인하였으며, 동진지구는 강우자료, 저수지 유역 자료, 농업용수 관개지구 자료 등을 분석하여 보다 신뢰도가 높은 데이터를 제공하고자 물순환 모니터링을 수행하였다.

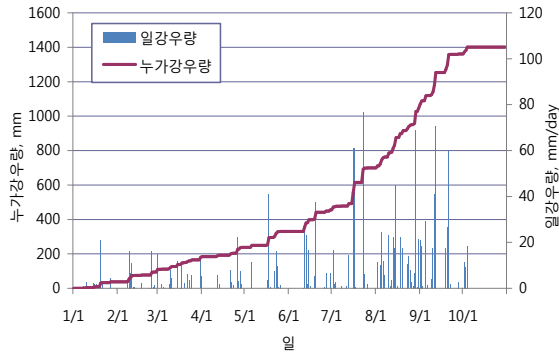
3.1. 강우자료

가. 이동지구

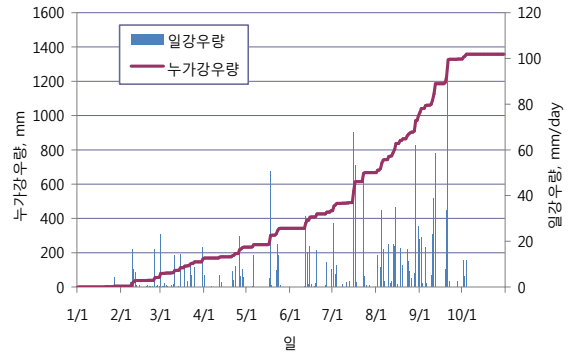
물순환 모니터링을 위해 이동지구의 2010년 1월부터 2013년 4월까지 월별 및 일별 강우 데이터를 구축하였다. <표 3-9-18>은 구축한 2010년도 이동지구의 지점별 월 강우량 데이터를 나타낸 것이고, (그림 3-9-7)은 이동지구의 지점별 누가강우량을 일별로 도시한 것이다.

<표 3-9-18> 지점별 월 강우량(2010)

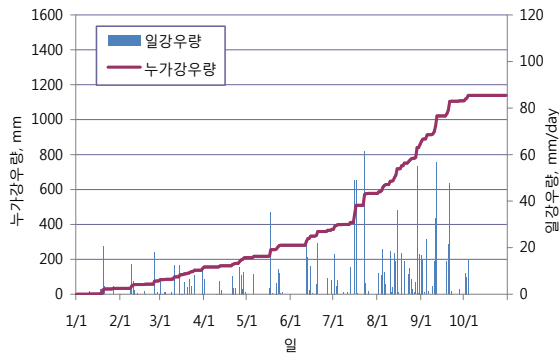
월 별	월강우량(mm)			평균
	용덕	미산	이동	
1월	5.0	33.2	37.8	25.3
2월	74.1	50.0	57.2	60.4
3월	89.9	72.4	84.0	82.1
4월	64.2	53.4	59.2	58.9
5월	109.1	72.1	91.8	91.0
6월	102.4	90.9	125.4	106.2
7월	222.9	205.4	244.2	224.2
8월	350.6	296.7	349.1	332.1
9월	311.9	233.7	312.8	286.1
10월	28.3	31.3	39.0	32.9
11월	0.0	0.0	0.0	0.0
12월	0.0	0.0	0.0	0.0
계	1358.3	1139.1	1400.6	1299.3



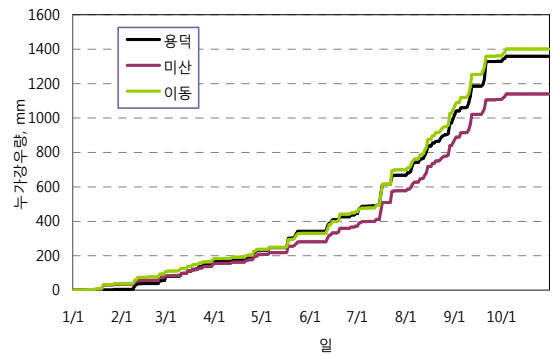
(a) 이동지점 일별 및 누가강우량



(b) 용덕지점 일별 및 누가강우량



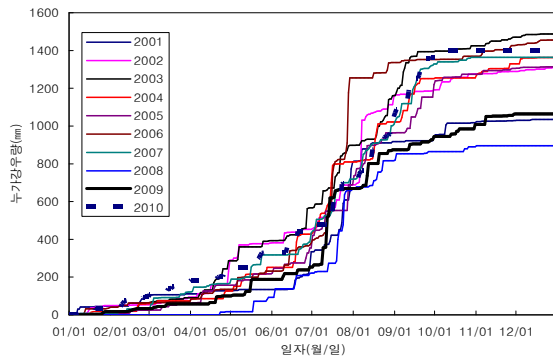
(c) 미산지점 일별 및 누가강우량



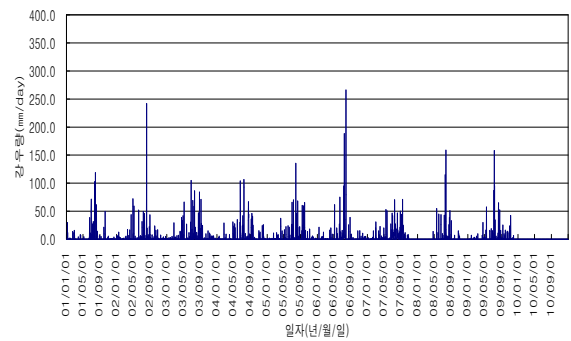
(d) 이동지구 지점별 누가강우량

(그림 3-9-7) 이동지구 지점별 일별강우량 및 누가강우량

강우데이터의 연별 비교를 통해 강우량의 월변화 추세를 보이는지 연도별로 비교하였다. (그림 3-9-8)의 (a)는 2001년~2010년까지 이동지점의 연도별 누가강우량을 도시한 것이고, (b)는 이동지점의 일별 강우량 변화를 도시한 것이다. <표 3-9-19>와 (그림 3-9-9)는 2009년과 2010년의 월별 강우량 변화와 누적 강우량의 변화를 도시한 것이다.



(a) 이동지점 연도별 누가강우량

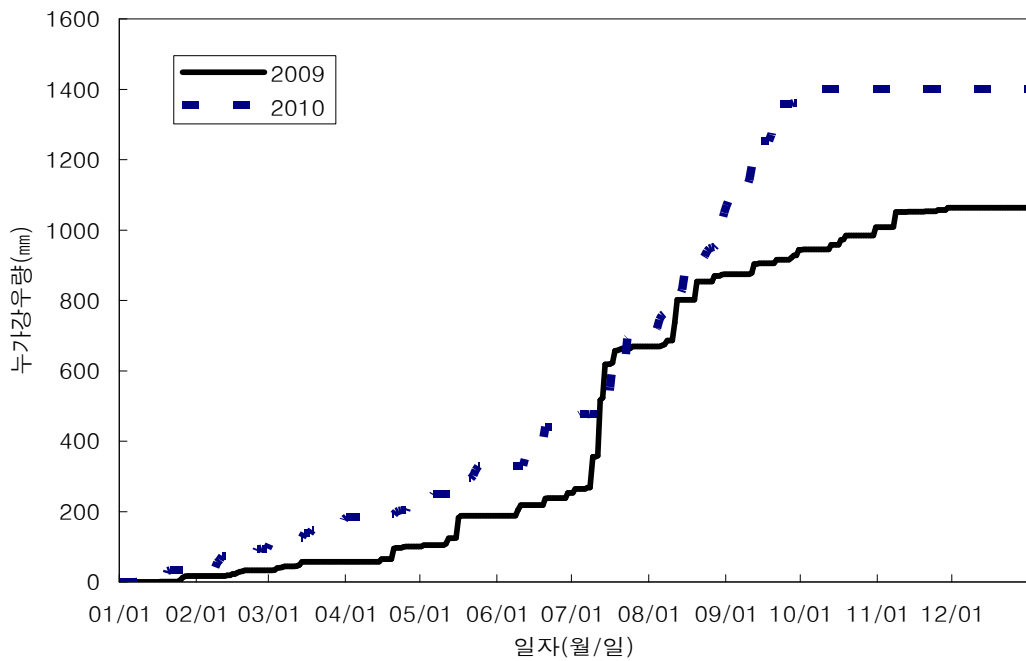


(b) 이동지점 일별 강우량 변화

(그림 3-9-8) 이동지점 연도별 누가강우량 및 일별 강우량

<표 3-9-19> 전년도 강수량 비교(2009, 2010)

월	2009		2010		차이	비고
	강수량	누가강수량	강수량	누가강수량		
1월	16.6	16.6	37.8	37.8	21.2	
2월	16.4	33.0	57.2	95.0	40.8	
3월	24.8	57.8	84.0	179.0	59.2	
4월	42.6	100.4	59.2	238.2	16.6	
5월	88	188.4	91.8	330.0	3.8	
6월	65	253.4	125.4	455.4	60.4	
7월	415.8	669.2	244.2	699.6	-171.6	
8월	204.8	874.0	349.1	1048.8	144.3	
9월	70.4	944.4	312.8	1361.6	242.4	
10월	63.8	1008.2	39.0	1400.6	-24.8	
계	1063.8		1400.6		336.8	



(그림 3-9-9) 누가강수량 전년도 비교

다음 <표 3-9-20>은 이동지점의 2011년 1월부터 2013년 4월까지 월 강수량을 나타낸다. 2010, 2011년에는 7월, 2012년에는 8월에 강우가 집중되었던 것으로 나타났으며, 월 누적강수량의 그래프는 우기 전은 다른 양상을 보이거나 우기 이후에는 비슷한 양상을 보이는 것으로 나타났다.

<표 3-9-20> 이동지점 월 강우량(2011.01~2013.04)

월 별	이동지점 월강우량(mm)			평균
	2011년	2012년	2013년	
01월	-	2.0	18.5	10.25
02월	-	1.0	40	20.5
03월	-	39.0	44.5	41.75
04월	-	92.5	55.5	74.0
05월	96.5	96.5	-	96.5
06월	186.0	10.0	-	98.0
07월	406.0	138.0	-	272.0
08월	4.0	315.5	-	159.8
09월	1.5	165.0	-	83.3
10월	11.5	72.0	-	41.8
11월	2.0	68.0	-	35.0
12월	9.0	27.0	-	18.0
계	877.0	1026.5	158.5	687.3

나. 동진지구

물순환 모니터링을 위해 동진지구의 동진지점 2012년 7월부터 2013년 4월까지 월별 및 일별 강우 데이터를 구축하였다. <표 3-9-21>은 구축한 지점별 월 강우량 데이터를 나타낸 것이고, (그림 3-9-10)은 동진지구의 월별 강우량을 도시한 것이다.

<표 3-9-21> 동진지점 월강우량(2012.07~2013.04)

월별	2012년 07월	2012년 08월	2012년 09월	2012년 10월	2012년 11월	2012년 12월	2013년 01월	2013년 02월	2013년 03월	2013년 04월
강우량 (mm)	240.0	561.5	160.5	54.0	15	27	6.5	24	68	17



(그림 3-9-10) 동진지점 월 강우량

또한 (그림 3-9-11)은 2012년 7월부터 2012년 10월까지 동진지점의 일 강우량 자료를 그래프로 도시한 것이다. 여름철 강우와 겨울철 강설을 비교적 잘 반영하고 있다.



(a) 2012년 07월 ~2012년 08월



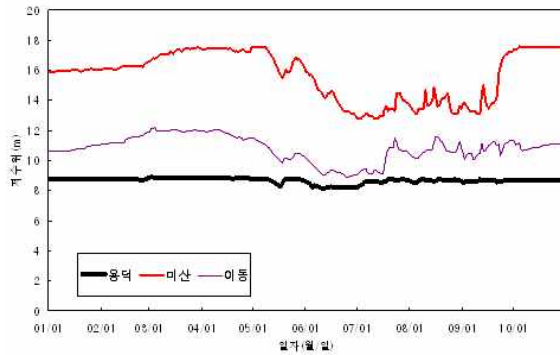
(b) 2012년 09월 ~2012년 10월

(그림 3-9-11) 동진지점 일 강우량

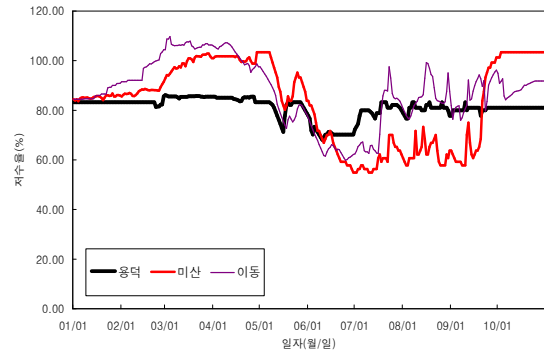
3.2. 저수지 유역자료

가. 이동지구

이동지구의 용덕저수지, 미산저수지, 이동저수지에 대해 2010년도와 2012, 2013년도의 월별 및 일별 수위자료 및 저수율 자료를 구축하였다. 일별 수위 변화와 저수율 변화를 (그림 3-9-12) 및 (그림 3-9-13)에 나타냈으며 미산저수지가 가장 큰 폭으로 변화하였고, 용덕저수지가 가장 변화가 적은 것으로 나타났다.



(그림 3-9-12) 저수지 일별 수위변화



(그림 3-9-13) 저수지 일별 저수율 변화

또한 용덕저수지, 미산저수지, 이동저수지에 대해 수위-내용적 자료를 구축하였다. 그 내용은 <표 3-9-22>, <표 3-9-23>, <표 3-9-24>와 같다.

<표 3-9-22> 용덕저수지 수위 내용적 표고

저수위(m)	저수량(m ³ -10)	저수율(%)	비 고
2.50	0	0.0	만수위 : 9.5m 홍수위 : 10.5m
3.00	6	0.6	
3.50	22	2.3	
4.00	47	5.0	
4.50	82	8.6	
5.00	125	13.1	
5.50	183	19.3	
6.00	259	27.3	
6.50	345	36.4	
7.00	437	46.1	
7.50	534	56.3	
8.00	635	66.9	
8.50	737	77.7	
9.00	842	88.7	
9.50	949	100.0	

<표 3-9-23> 미산저수지 수위 내용적 표고

저수위(m)	저수량(m ³ -10)	저수율(%)	비 고
2.00	58	3.4	만수위 : 9.5m 홍수위 : 10.5m
3.00	97	5.7	
4.00	145	8.5	
5.00	205	12.1	
6.00	277	16.3	
7.00	361	21.3	
8.00	455	26.8	
9.00	558	32.9	
10.00	670	39.5	
11.00	795	46.8	
12.00	934	55.0	
13.00	1084	63.8	
14.00	1245	73.3	
15.00	1417	83.5	
16.00	1602	94.3	

<표 3-9-24> 이동저수지 수위 내용적 표고

저수위(m)	저수량(m ³ -10)	저수율(%)	비 고
0	43.3	0.2	만수위 : 9.5m 홍수위 : 10.5m
1	389.9	1.9	
2	1044.0	5.0	
3	1948.6	9.3	
4	3047.6	14.5	
5	4382.7	20.9	
6	5998.7	28.6	
7	7945.1	37.9	
8	10288.7	49.1	
9	12962.7	61.9	
10	15829.2	75.6	
11	18821.2	89.8	
11.7	20949.7	100	

나. 동진지구

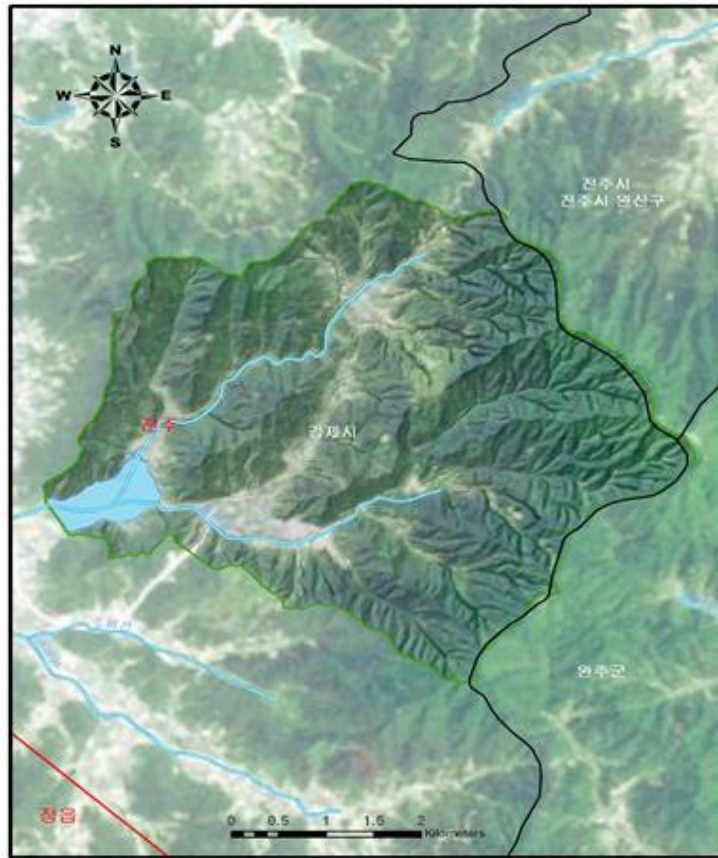
(1) 금평저수지

금평저수지는 전라북도 김제시 금산면 금산리에 위치하며, 1961년에 준공된 아주 오래된 저수지이다. 유각천 말단부에 위치하며, 유역면적은 25.71 km², 유로연장은 6.54 km이다(그림 3-9-14).

본 저수지 유역 내에는 기상관측소가 없어서 유역 인근에 위치한 전주관측소의 기상 자료를 이용하고 있으며, 본 저수지 유역의 일반적인 기상특성을 파악하기 위하여 전주관측소의 1967년~2005년 (39개년)까지 관측기록을 분석하였다. 전주관측소의 연평균강수량은 1,326.5 mm로서 우리나라 연평균강수량 1,245 mm보다 많은 편이며, 월평균 최대강수량은 7월이 279.5 mm로 가장 많고 6월~9월까지의 강수량이 연평균강수량의 65%를 차지하여 하절기 강우의 집중도가 매우 높다.

금평저수지에 대한 주요 제원은 <표 3-9-25>와 같으며, 한국농어촌공사 동진지사

유지관리 자료를 활용하였다.

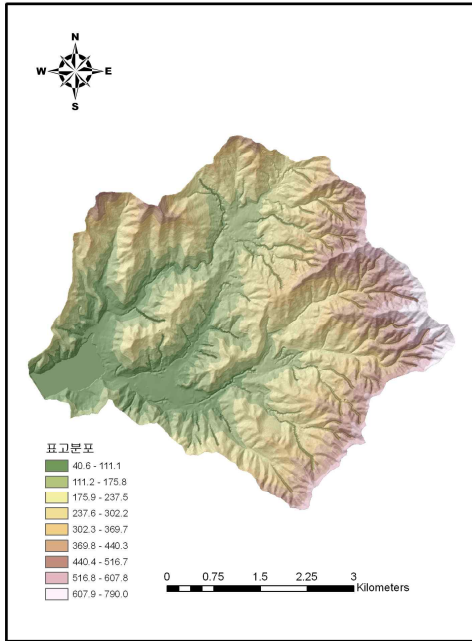


(그림 3-9-14) 유각천 및 금평저수지 유역 현황도

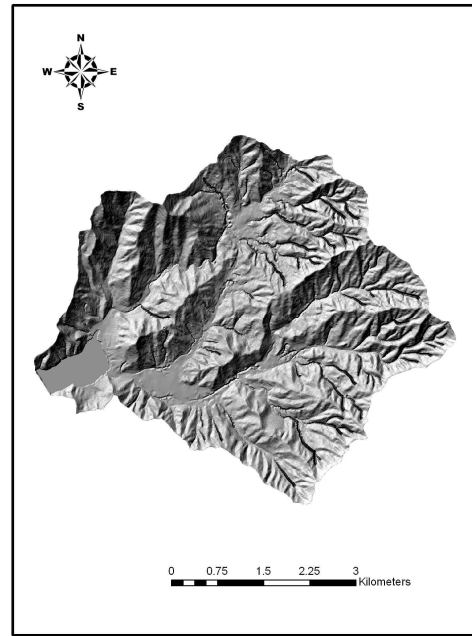
<표 3-9-25> 금평저수지 주요 설계제원

시 설		내 용	단 위	설계제원	비 고
저수지	면 적	유역면적	ha	2,571	
		만수면적	"	57.39	
	저 수 량	총저수량	만 m ³	667	
		유효저수량	"	525.2	
	관리수위	홍수위	El.m	54.3	
		만수위	"	54	
사수위		"	38		
제 당	댐형식			필댐	
	제당표고	El.m	57		
	댐길이	m	443		
	댐높이	m	17.7		
여수토 방수로	여수토	형 식		Radial Gate/측구식	
		Sill	El.m	49.0/54.0	
		규 모	m	6.0×5.0×3 L=3.8 (2개소)	B×H×런
		접근수로수심	m	1.5/6.5	
	방수로	일류수심	m	5.3/0.3	
		형 식		콘크리트 개거	
		방수로 폭	m	35	
		방수로 길이	m	60	

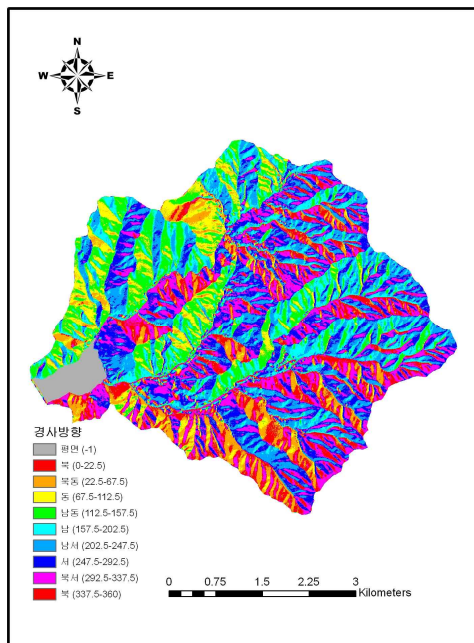
유역의 지형학적 특성은 중부원점 기준의 수치지도 (S=1:50,000)로부터 DEM (Digital Elevation Model) 및 하천망 등의 GIS layer를 구축하여 추출하였다(그림 3-9-15). 이들 지형학적 특성들은 유역의 표고와 경사에 따라 변화하는 강우, 증발, 식생 등 기상특성의 영향을 파악할 수 있는 기초자료로 활용이 가능하다.



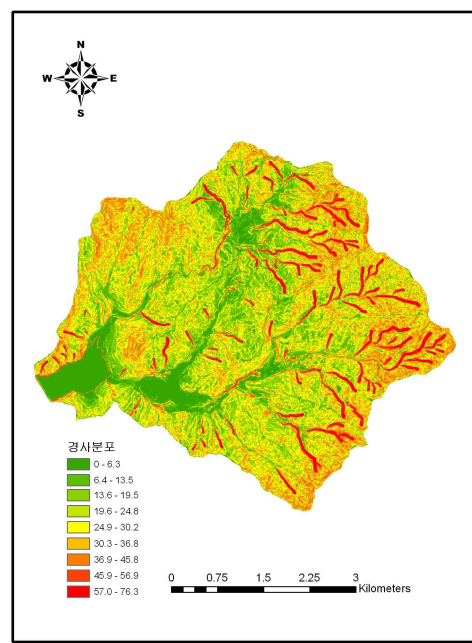
(a) 표고분포도



(b) 음영기복도



(c) 경사방향도



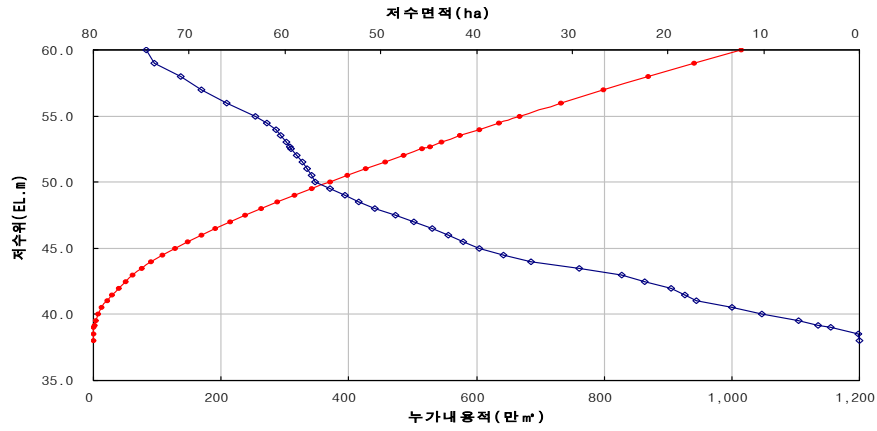
(d) 경사분포도

(그림 3-9-15) 금평저수지 유역 특성

(그림 3-9-16)은 금평저수지의 표고별 내용적 관계를 도시한 것이며, <표 3-9-26>은 표고별 저수지 내용적을 정리한 것이다.

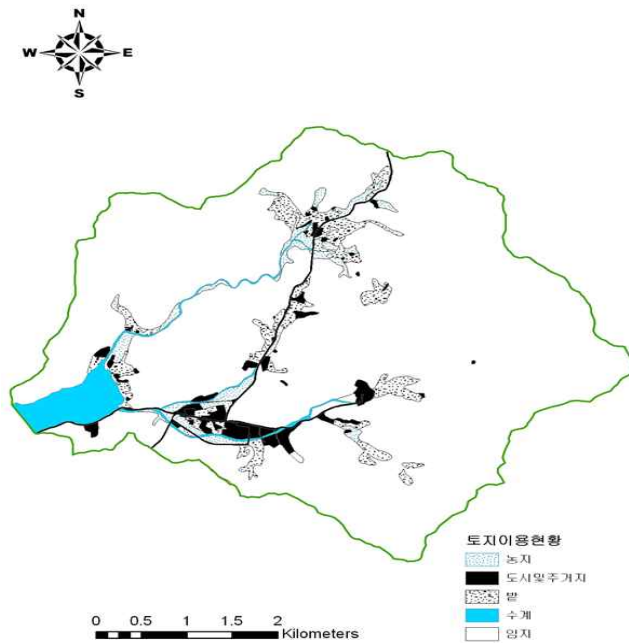
<표 3-9-26> 금평저수지 표고별 내용적

표 고 (El.m)	고 차 (m)	면 적 (ha)	평균면적 (ha)	내용적 (만 m ³)	누가내용적 (만 m ³)	비 고
38.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	D.W.L
38.50	0.5	0.16	0.08	0.04	0.04	
39.00	0.5	2.98	1.57	0.79	0.83	
39.20	0.2	4.32	3.65	0.73	1.56	
39.50	0.3	6.34	5.33	1.60	3.16	
40.00	0.5	10.19	8.27	4.13	7.29	
40.50	0.5	13.31	11.75	5.88	13.17	
41.00	0.5	17.08	15.20	7.60	20.77	
41.50	0.5	18.22	17.65	8.83	29.59	
42.00	0.5	19.71	18.97	9.48	39.08	
42.50	0.5	22.37	21.04	10.52	49.60	
43.00	0.5	24.78	23.58	11.79	61.38	
43.50	0.5	29.23	27.00	13.50	74.88	
44.00	0.5	34.27	31.75	15.88	90.76	
44.50	0.5	37.13	35.70	17.85	108.61	
45.00	0.5	39.65	38.39	19.20	127.81	
45.50	0.5	41.32	40.49	20.24	148.05	
46.00	0.5	42.93	42.13	21.06	169.11	
46.50	0.5	44.58	43.76	21.88	190.99	
47.00	0.5	46.56	45.57	22.79	213.78	
47.50	0.5	48.47	47.51	23.76	237.54	
48.00	0.5	50.66	49.57	24.78	262.32	
48.50	0.5	52.30	51.48	25.74	288.06	
49.00	0.5	53.78	53.04	26.52	314.58	
49.50	0.5	55.35	54.56	27.28	341.86	
50.00	0.5	56.80	56.07	28.04	369.89	
50.50	0.5	57.22	57.01	28.51	398.40	
51.00	0.5	57.67	57.44	28.72	427.12	
51.50	0.5	58.21	57.94	28.97	456.09	
52.00	0.5	58.77	58.49	29.24	485.33	
52.50	0.5	59.32	59.04	29.52	514.86	
52.70	0.2	59.54	59.43	11.89	526.74	F.W.L
53.00	0.3	59.87	59.71	17.91	544.65	
53.50	0.5	60.45	60.16	30.08	574.73	
54.00	0.5	60.91	60.68	30.34	605.07	
54.50	0.5	61.88	61.40	30.70	635.77	
55.00	0.5	63.11	62.49	31.25	667.02	
56.00	1.0	66.14	64.62	64.62	731.64	이하 GIS 추출
57.00	1.0	68.72	67.43	67.43	799.07	
58.00	1.0	70.85	69.79	69.79	868.86	
59.00	1.0	73.68	72.27	72.27	941.13	
60.00	1.0	74.52	74.10	74.10	1,015.22	



(그림 3-9-16) 금평저수지 표고별 면적 내용적 곡선

금평저수지 유역의 토지이용 현황을 살펴보면 유역면적의 86.5 %가 임야(산림)로 구성되어 있는 것으로 조사되었으며, 자세한 내용은 (그림 3-9-17) 및 <표 3-9-27>과 같다.



(그림 3-9-17) 금평저수지 유역 내 토지이용 현황도

<표 3-9-27> 금평저수지 유역내 토지이용현황

토지이용현황	면 적 (ha)	구성비 (%)	비 고
산림	2,223.6	86.5	
논	65.8	2.6	
밭	122.2	4.8	
대 지	81.9	3.2	
수 면	77.5	3.0	
합 계	2,571.0	100.0	

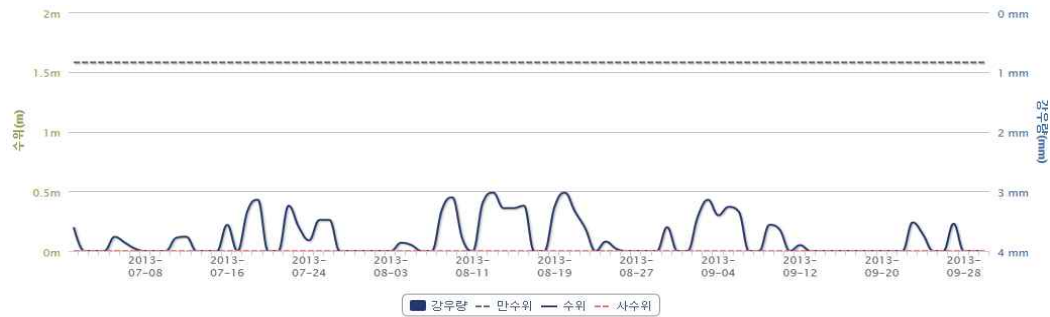
(그림 3-9-18)은 한국농어촌공사에서 운영중인 농촌용수종합시스템에서 확보한 금평저수지의 수위 변화를 도시한 것이고, (그림 3-9-19)는 금평저수지 하류부 금평수로 수위변화를 관개기간 동안 도시한 것이다.



(그림 3-9-18) 금평저수지 수위 변화 (2012.1 - 2013.12)



(a) 금평수로 수위변화 (2013.4.1. - 2013.6.30.)



(b) 금평수로 수위변화 (2013.7.1. - 2013.9.30.)



(c) 금평수로 수위변화 (2012.1.1. - 2013.9.30.)

(그림 3-9-19) 금평저수지 하류부 금평수로 수위 변화

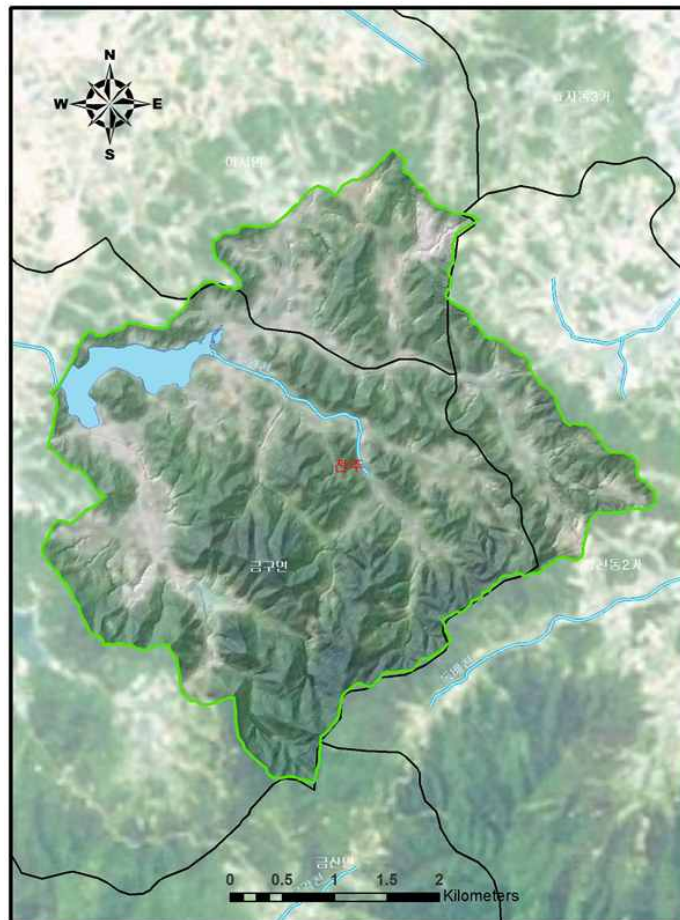
(2) 대화저수지

대화저수지는 1960년에 착공하여 1967년에 준공된 저수지이다. 수계는 동진강수계로 서해로 직접 유입되는 동진강의 제2지류인 지방2급 유각천 상류에 위치하고 있으며, 행정구역상으로 전라북도 김제시 금구면 대화리에 속한다(그림 3-9-20).

대화저수지의 유역면적은 1,840 ha, 관개면적은 719 ha이고, 총저수량은 281 만 m³으로서 유역면적은 크지 않지만 농업용저수지 중에서는 저수량이 비교적 큰 편에 속하는 중규모 저수지이다. 댐 형식은 필댐으로 댐 높이는 9.6 m, 댐 길이는 226 m이다. 저수지 제정의 상단표고는 El.37.0m이고, 홍수위는 El.36.14m, 만수위는 El.34.84m, 홍수기관리수위는 El.33.95m, 사수위는 El.29.34m로 관리되고 있으며 홍수배제시설인 여수로는 월류식이다.

본 저수지 유역 내에는 기상관측소가 없어서 유역 인근에 위치한 전주관측소의 기상 자료를 이용하고 있으며, 연평균강수량은 1,357.8 mm로서 우리나라 연평균강수량 1,245 mm보다 많은 편이며, 월평균 최다강수량은 7월이 293.4 mm로 가장 많고 6월~9월까지의 강수량이 연평균강수량의 69 %를 차지하여 하절기 강우의 집중도가 매우 높다.

대화저수지에 대한 주요 제원은 <표 3-9-28>과 같으며, 한국농어촌공사 동진지사의 자료를 활용하였다.

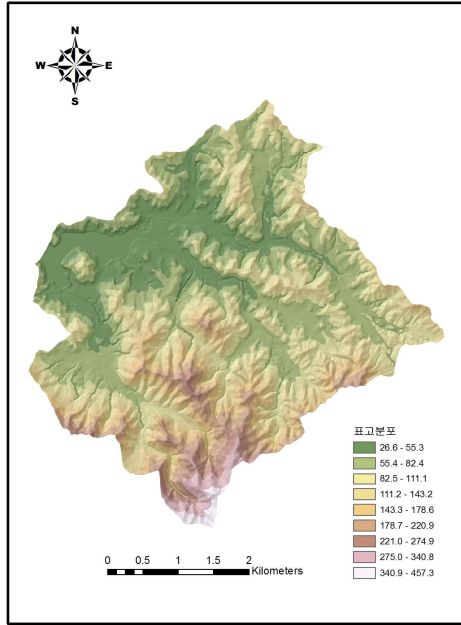


(그림 3-9-20) 두월천 및 대화저수지 유역 현황도

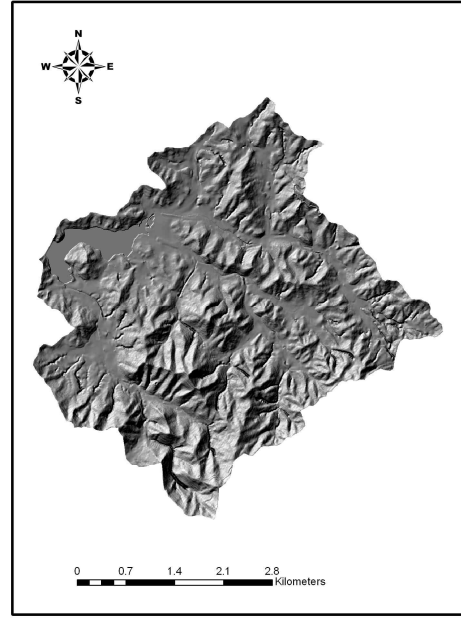
<표 3-9-28> 대화저수지 주요 설계제원

시 설		내 용	단 위	설계제원	비 고
저수지	면 적	유역면적	ha	1,840	
		만수면적	"	55.6	
	저 수 량	총저수량	만 m ³	280.7	
		유효저수량	"	240.5	
	관리수위	홍수위	El.m	-36.14	()안전진단
		만수위	"	34.84	
		홍수기관리수위	"	-33.95	()관리규정
		사수위	"	29.34	
댐	형 식			중심코어형 필댐	
	제정표고	El.m	37		
	Core상단표고	"	-		
	길 이	m	226		
	높 이	m	9.6		
여수토 방수로	여수토	형 식		월류식(측구식)	
		Weir Crest	El.m	34.84/34.34	요철부 상하단
		규 모	m	17.50/57.50	
		접근수로수심	m	(0.9/0.4)	()실측
		월류수심	m	(1.3/1.8)	()안전진단
	방수로	형 식		콘크리트 개거	
		방수로 폭	m		
방수로 길이		m			
취수시설	형 식		사통		
	규모(D×런)	m	0.6m×2공		
	취수능력	m ³ /s	-		

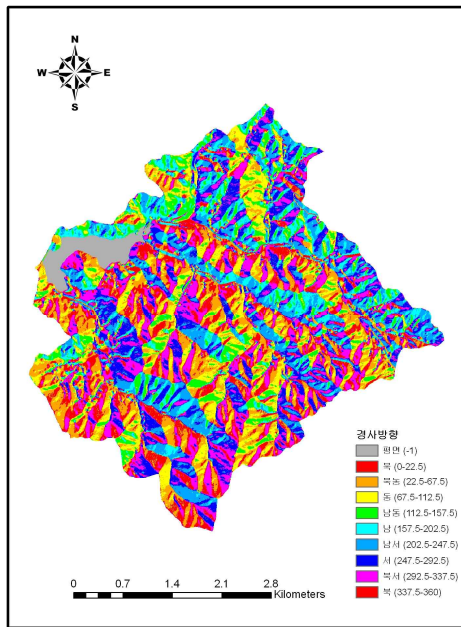
유역의 지형학적 특성은 중부원점 기준의 수치지도 (S=1:50,000)로부터 DEM (Digital Elevation Model) 및 하천망 등의 GIS layer를 구축하여 추출하였다 (그림 3-9-21). 이들 지형학적 특성들은 유역의 표고와 경사에 따라 변화하는 강우, 증발, 식생 등 기상특성의 영향을 파악할 수 있는 기초자료로 활용이 가능하다.



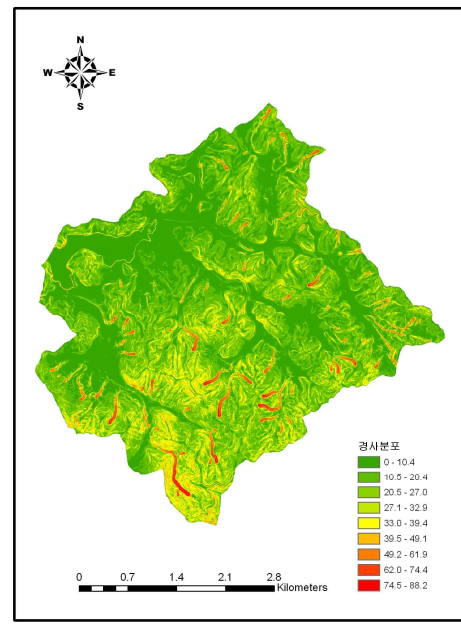
(a) 표고분포도



(b) 음영기복도



(c) 경사방향도



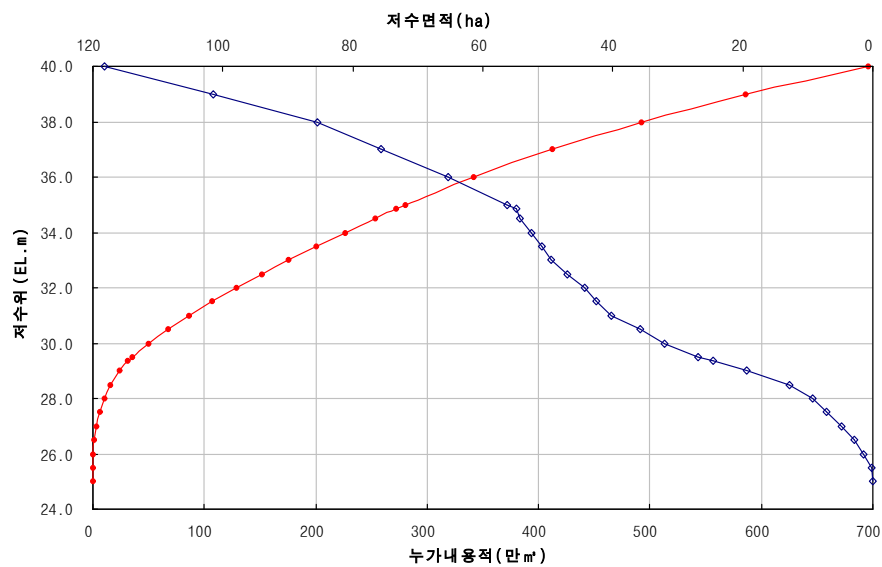
(d) 경사분포도

(그림 3-9-21) 대화저수지 유역 특성

(그림 3-9-22)는 저수지의 표고별 내용적 관계를 도시한 것이며, <표 3-9-29>는 표고별 저수지 내용적을 정리한 것이다.

<표 3-9-29> 대화저수지 표고별 내용적

표 고 (El.m)	고 차 (m)	면 적 (ha)	평균면적 (ha)	내용적 (만m ³)	누가내용적 (만m ³)	비 고
25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
25.5	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	
26.0	0.5	1.4	0.8	0.4	0.4	
26.5	0.5	2.9	2.1	1.1	1.5	
27.0	0.5	4.8	3.8	1.9	3.4	
27.5	0.5	7.2	6.0	3.0	6.4	
28.0	0.5	9.2	8.2	4.1	10.5	
28.5	0.5	12.9	11.0	5.5	16.0	
29.0	0.5	19.3	16.1	8.1	24.1	
29.3	0.3	24.5	21.9	7.5	31.6	
29.5	0.2	26.9	25.7	4.0	35.6	
30.0	0.5	32.0	29.4	14.7	50.4	
30.5	0.5	35.8	33.9	17.0	67.3	
31.0	0.5	40.2	38.0	19.0	86.4	
31.5	0.5	42.5	41.4	20.7	107.0	
32.0	0.5	44.4	43.5	21.7	128.8	
32.5	0.5	46.9	45.6	22.8	151.6	
33.0	0.5	49.5	48.2	24.1	175.7	
33.5	0.5	50.9	50.2	25.1	200.8	
34.0	0.5	52.5	51.7	25.9	226.7	
34.5	0.5	54.2	53.4	26.7	253.3	
34.8	0.3	54.9	54.6	18.8	272.1	F.W.L
35.0	0.2	56.2	55.6	8.7	280.8	
36.0	1.0	65.4	60.8	60.8	341.6	이하 GIS 추출
37.0	1.0	75.6	70.5	70.5	412.1	
38.0	1.0	85.5	80.6	80.6	492.7	
39.0	1.0	101.5	93.5	93.5	586.2	
40.0	1.0	118.2	109.8	109.8	696.0	

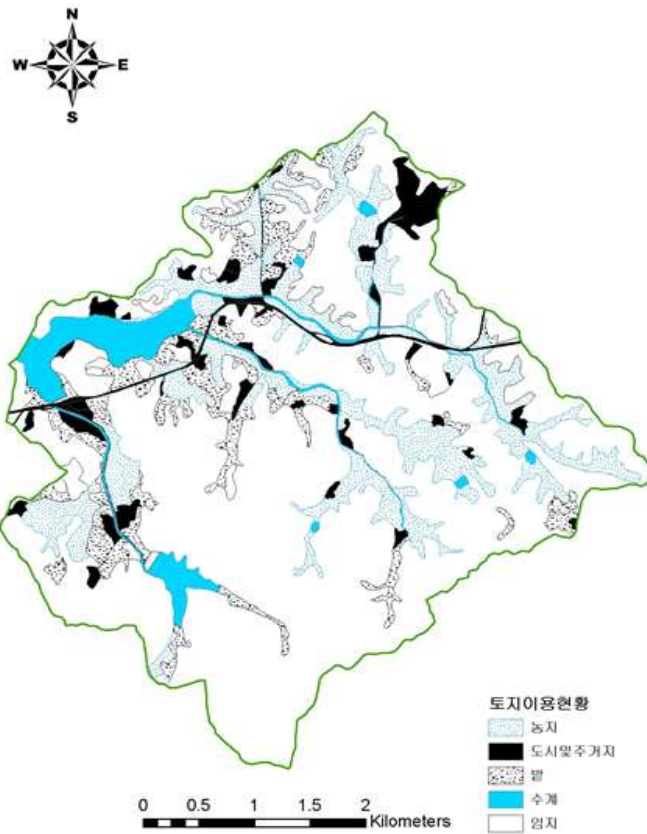


(그림 3-9-22) 대화저수지 표고별 면적 및 내용적 곡선

대화저수지 유역의 토지이용 현황을 살펴보면 유역면적의 65.2 %가 임야 (산림)로 구성되어 있는 것으로 조사되었으며, 자세한 내용은 <표 3-9-30> 및 (그림 3-9-23)과 같다.

<표 3-9-30> 대화저수지 유역내 토지이용현황

토지이용현황	면 적 (ha)	구성비 (%)	비 고
산림	1,200.2	65.2	
논	300.7	16.3	
밭	158.3	8.6	
대 지	90.1	4.9	
수 면	90.7	4.9	
합 계	1,840.0	100.0	



(그림 3-9-23) 대화저수지 유역 내 토지이용 현황도

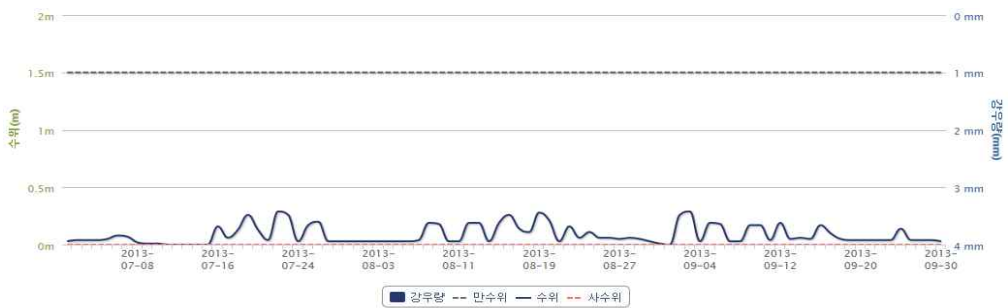
(그림 3-9-24)는 한국농어촌공사에서 운영 중인 농촌용수종합시스템에서 확보한 대화저수지의 수위 변화를 도시한 것이고, (그림 3-9-25)는 대화저수지 하류부 대화수로 수위변화를 관개기간 동안 도시한 것이다.



(그림 3-9-24) 대화저수지 수위 변화 (2012.1 - 2013.12)



(a) 대화수로 수위변화 (2013.4.1. - 2013.6.30.)



(b) 대화수로 수위변화 (2013.7.1. - 2013.9.30.)



(c) 대화수로 수위변화 (2012.1.1. - 2013.12.30.)

(그림 3-9-25) 대화저수지 하류부 금평수로 수위 변화

다음으로 동진지구내의 수위자료는 낙양보 지점과 김제간선지점, 정읍간선지점에 대해 2012년 6월~2013년 4월까지 수위를 측정하였고, (그림 3-9-26)은 월별 수위변화를 도시한 것이다. 두 지점 모두 2012년 10월부터 수위가 낮아진 것으로 나타났다.



(a) 2012년 06월 ~ 2013년 04월 낙양보상류지점 월 수위변화



(b) 2012년 04월 ~ 2013년 03월 김제간선지점 월 수위변화

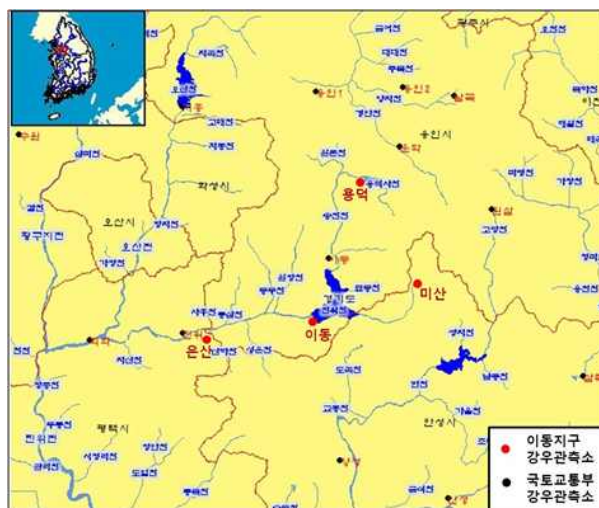


(c) 2012년 04월 ~ 2013년 03월 정읍간선지점 월 수위변화
(그림 3-9-26) 동진지구내 수위자료

3.3. 모니터링 자료 품질평가

가. 이동지구 강우자료 상관성 분석

강우자료를 사용하기 위해서는 장기간 자료에 대한 일관성 검사가 필요하며, 이를 위해서는 인접한 관측소들의 강우자료와 동질성 확보가 중요하다. 또한 강우관측소에서 결측이 발생하였을 경우 인접한 관측소의 강우자료를 사용하여 보삽할 수 있으며, 관측소의 강우특성이 유사하면 보삽의 정확성을 향상시킬 수 있다. 따라서 이동지구 내 강우관측소의 강우자료를 인접한 관측소들과 상관분석을 실시하여 자료의 정확성과 강우특성의 유사여부를 파악하였다. 이동지구에 설치된 강우관측소는 (그림 3-9-27)과 같이 용덕, 미산, 이동, 은산 강우관측소를 포함하여 총 4곳이 있으며, 유역내에 위치한 국토교통부 우량관측소는 진위, 이동 우량관측소를 포함하여 총 2곳이 있다.



(그림 3-9-27) 이동지구의 강우관측소 위치

(1) 이동강우관측소

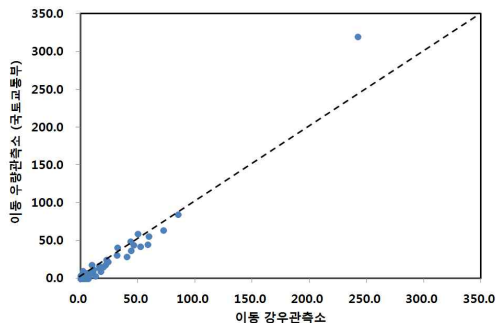
이동강우관측소의 자료 정확성과 인접한 관측소들 사이의 강우특성 유사여부를 평가하

기 위하여 2001년~2010년의 강우자료를 유역 내에 위치한 국토교통부의 이동우량관측소의 강우자료와 상관성분석을 실시하였다. 이동우량관측소는 경기도 용인시 이동면 경기도로 673 이동면사무소에 설치되어 있으며, 1995년 8월부터 강우량을 관측하고 있다.

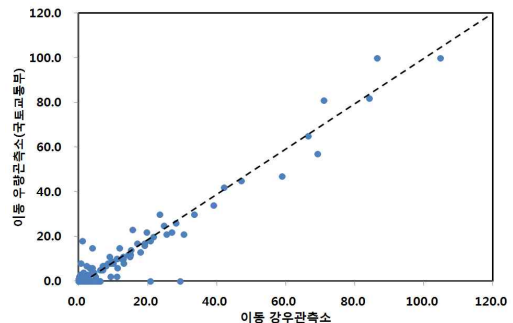
<표 3-9-31>은 두 관측소의 일별 강우량을 상관성분석을 한 결과를 나타낸 것이다. 2001년, 2004년, 2007년을 제외하고 두 관측소 자료 사이의 상관계수가 0.97 이상으로 매우 높은 결과를 나타냈다. (그림 3-9-28)은 두 관측소의 일별 강우량을 1:1 그래프로 비교한 것이며, 두 관측소의 자료들이 1:1 선상에 밀집한 것으로 파악되었다. 따라서 2001년~2010년의 이동강우관측소의 강우자료의 품질은 양호한 것으로 파악되었으며, 활용이 가능한 것으로 판단된다.

<표 3-9-31> 이동강우관측소와 이동우량관측소의 강우상관성 분석 결과

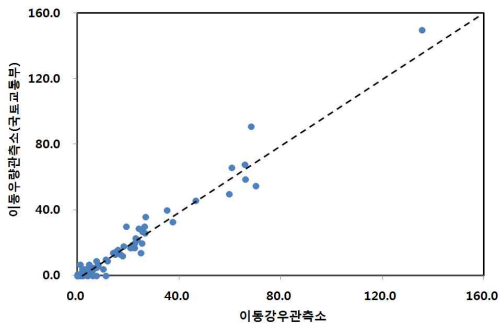
연도	강우량 (mm)		상관계수	비고
	이동강우관측소	이동우량관측소		
2001	1,042.4	996.5	0.65	
2002	1,309.6	1,267.5	0.98	
2003	1,487.3	1,304.0	0.97	
2004	1,362.8	1,228.0	0.79	이동우량관측소 이상
2005	1,314.2	1,228.0	0.98	
2006	1,455.2	1,252.0	0.97	
2007	1,364.0	1,153.0	0.62	이동우량관측소 이상
2008	-	-	-	
2009	1,063.8	1,089.0	0.98	
2010	1,400.6	1,409.0	0.97	



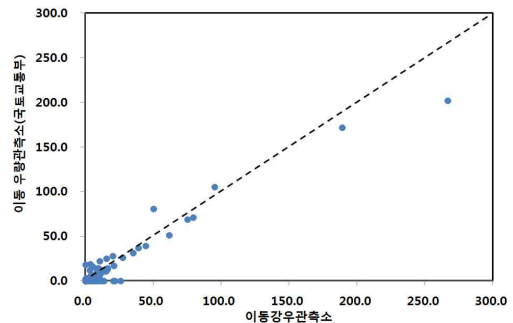
(a) 2002년



(b) 2003년



(c) 2005년



(d) 2006년

(그림 3-9-28) 이동강우관측소과 이동우량관측소 강우량의 1:1 비교

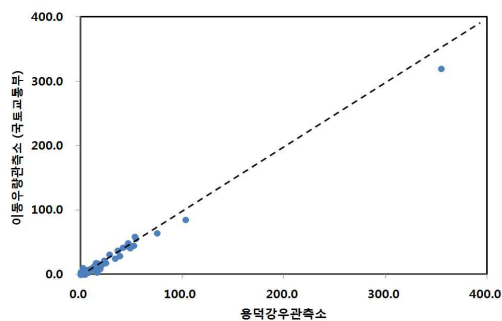
(2) 용덕강우관측소

용덕강우관측소의 자료 정확성과 인접한 관측소들 사이의 강우특성 유사여부를 평가하기 위하여 2001년~2010년의 강우자료를 유역 내에 위치한 국토교통부의 이동우량관측소의 강우자료와 상관성분석을 실시하였다.

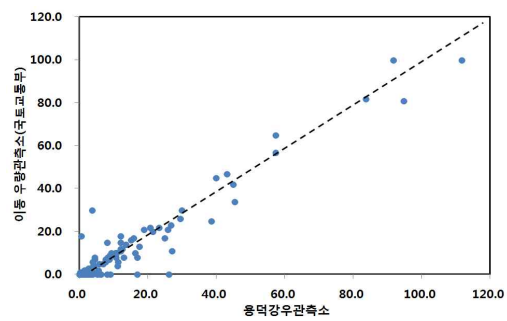
<표 3-9-32>는 두 관측소 일별 강우량 사이의 상관성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 2001년, 2004년, 2007년을 제외하고 두 관측소 자료 사이의 상관계수가 0.92 이상으로 매우 높은 결과를 나타냈다. (그림 3-9-29)는 두 관측소의 일별 강우량을 1:1 그래프로 비교한 것이며, 두 관측소의 자료들이 1:1 선상에 밀집한 것으로 파악되었다. 따라서 2001년 ~2010년의 용덕강우관측소의 강우자료의 품질은 양호한 것으로 파악되었으며, 활용이 가능한 것으로 판단된다.

<표 3-9-32> 용덕강우관측소와 이동우량관측소의 강우 상관성 분석 결과

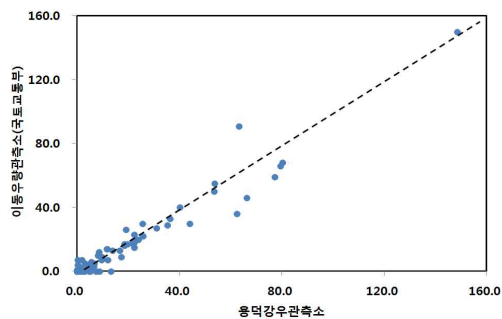
연도	강우량 (mm)		상관계수	비고
	용덕강우관측소	이동우량관측소		
2001	1,068.7	996.5	0.60	
2002	1,451.0	1,267.5	1.00	
2003	1,490.8	1,304.0	0.97	
2004	1,381.0	1,228.0	0.77	이동우량관측소 이상
2005	1,424.2	1,228.0	0.97	
2006	1,391.6	1,252.0	0.98	
2007	1,336.2	1,153.0	0.72	이동우량관측소 이상
2008	-	-	-	
2009	1,164.9	1,089.0	0.98	
2010	1,358.3	1,409.0	0.92	



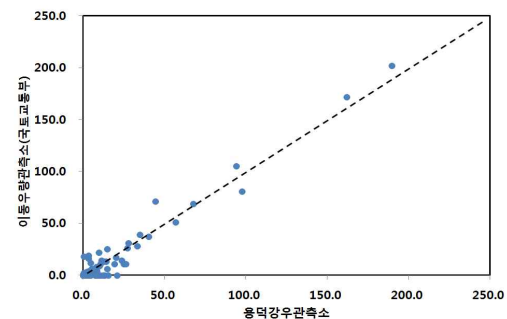
(a) 2002년



(b) 2003년



(c) 2005년



(d) 2006년

(그림 3-9-29) 용덕강우관측소와 이동우량관측소 강우량 1:1 비교

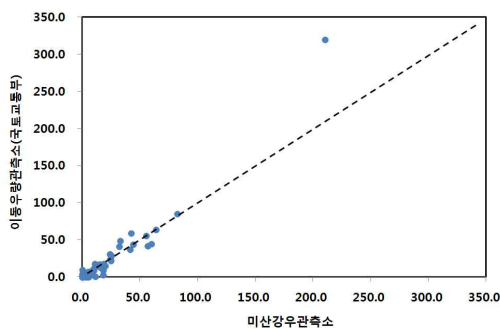
(3) 미산강우관측소

미산강우관측소의 자료 정확성과 인접한 관측소들 사이의 강우특성 유사여부를 평가하기 위하여 2001년~2010년의 강우자료를 유역 내에 위치한 국토교통부의 이동우량관측소의 강우자료와 상관성분석을 실시하였다.

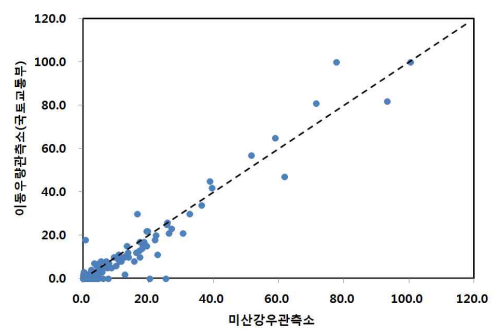
<표 3-9-33>은 두 관측소 일별 강우량 사이의 상관성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 2001년, 2004년, 2007년을 제외하고 두 관측소 자료 사이의 상관계수가 0.97 이상으로 매우 높은 결과를 나타냈다. (그림 3-9-30)은 두 관측소의 일별 강우량을 1:1 그래프로 비교한 것이며, 두 관측소의 자료들이 1:1 선상에 밀집한 것으로 파악되었다. 따라서 2001년~2010년의 미산강우관측소의 강우자료의 품질은 양호한 것으로 파악되었으며, 활용이 가능한 것으로 판단된다.

<표 3-9-33> 미산강우관측소와 이동우량관측소의 강우상관성 분석 결과

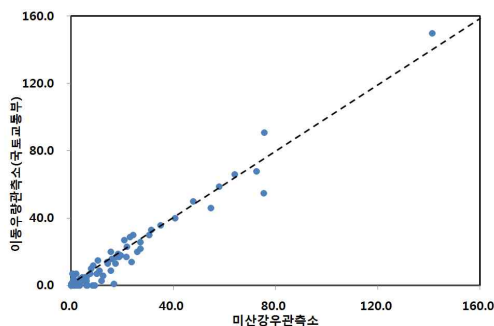
연도	강우량 (mm)		상관계수	비고
	미산강우관측소	이동우량관측소		
2001	982.1	996.5	0.58	
2002	1,206.2	1,267.5	0.97	
2003	1,465.6	1,304.0	0.97	
2004	1,261.0	1,228.0	0.79	이동우량관측소 이상
2005	1,331.4	1,228.0	0.98	
2006	1,436.4	1,252.0	0.97	
2007	1,294.2	1,153.0	0.60	이동우량관측소 이상
2008	-	-	-	
2009	1,001.7	1,089.0	0.98	
2010	1,139.1	1,409.0	0.97	



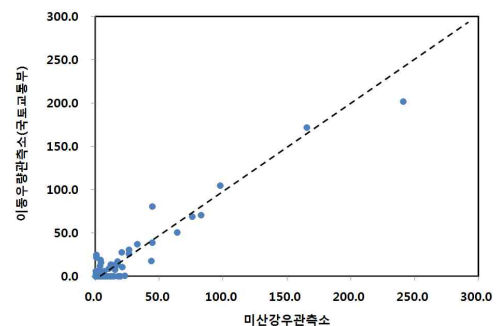
(a) 2002년



(b) 2003년



(c) 2005년



(d) 2006년

(그림 3-9-30) 미산강우관측소와 이동우량관측소 강우량의 1:1 비교

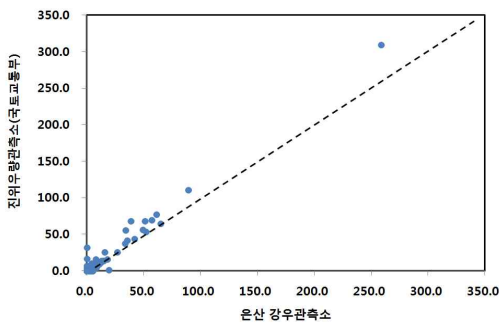
(4) 은산강우관측소

은산강우관측소의 자료 정확성과 인접한 관측소들 사이의 강우특성 유사여부를 평가하기 위하여 2001년~2009년의 강우자료를 유역 내에 위치한 국토교통부의 진위우량관측소의 강우자료와 상관성분석을 실시하였다. 진위우량관측소는 경기도 평택시 진위면 봉남길 61 진위면사무소에 위치하고 있으며, 1970년 1월부터 운영되고 있다.

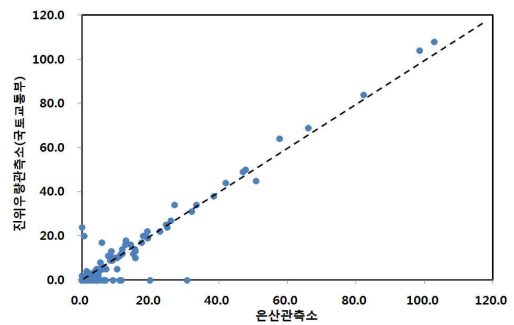
<표 3-9-34>는 두 관측소 일별 강우량 사이의 상관성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 2001년, 2007년을 제외하고 두 관측소 자료 사이의 상관계수가 0.92 이상으로 매우 높은 결과를 나타냈다. (그림 3-9-31)은 두 관측소의 일별 강우량을 1:1 그래프로 비교한 것이며, 두 관측소의 자료들이 1:1 선상에 밀집한 것으로 파악되었다. 따라서 2001년~2009년의 은산강우관측소의 강우자료의 품질은 양호한 것으로 파악되었으며, 활용이 가능한 것으로 판단된다.

<표 3-9-34> 은산강우관측소와 이동우량관측소의 강우 상관성 분석 결과

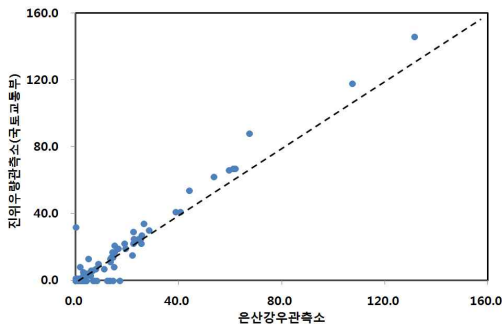
연도	강우량 (mm)		상관계수	비고
	은산강우관측소	진위우량관측소		
2001	927.9	1,093.5	0.70	
2002	1,226.0	1,481.5	0.99	
2003	1,404.5	1,343.0	0.97	
2004	1,346.9	1,081.0	0.92	
2005	1,306.1	1,333.0	0.98	
2006	1,420.3	1,398.0	0.99	
2007	860.8	1,330.0	0.50	진위우량관측소 자료이상
2008	-	-	-	
2009	1,043.9	1,011.0	0.97	



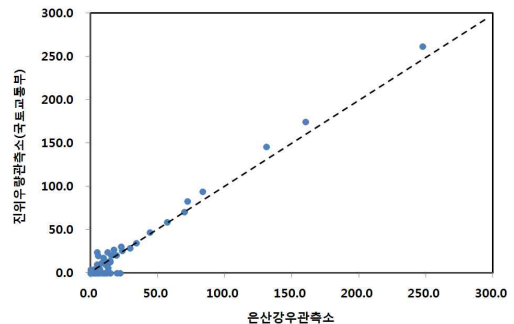
(a) 2002년



(b) 2003년



(c) 2005년



(d) 2006년

(그림 3-9-31) 은산강우관측소과 진위우량관측소 강우량의 1:1 비교

나. 이동지구 저수지 수위 및 농업용수 공급량 자료 품질 평가

이동지구에서는 논물가두기기가 기존의 농업용수량 산정기준인 5월 21일 ~ 6월 10일과 비교하여 35일 정도 일찍 시작하는 것으로 조사되었다. 모내기는 5월 12일 ~ 5월 26일에 실시되었으며, 기존의 농업용수량 산정기준 보다 10일 정도 일찍 시작하는 것으로 나타났으며, 이양기간도 5일 정도 짧아진 것으로 조사되었다. 대부분의 논에서 6월 하순에서 7월 초순 사이에 중간낙수를 실시하고 있는 것으로 밝혀졌다. 본 과업에서는 저수지 수위 및 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 기 개발된 저수지 유입량 모형을 사용하여 대상 저수지들의 저수위, 농업용수 공급량을 모의하여 측정된 자료와 비교하여 자료의 품질을 확인하였다. 저수지 유입량 모형에 대한 자세한 설명은 제 4 장에 수록되어 있다.

(1) 용덕저수지

(가) 위치 및 제원

용덕저수지는 행정구역상 경기도 용인시 처인구 이동면 묵리에 위치하고 있으며, 진위천의 지류인 송전천 상류에 위치하고 있다. 저수지 유역면적은 1,250 ha이며, 유효저수량은 949천 m³이며, 관개면적은 261.0 ha이다. 만수위는 EL. 9.5 m이며, 홍수위는 10.5 m이며, 자유월류식이다. <표 3-9-35>는 용덕저수지의 수위-내용적 관계를 나타낸 것이다.

<표 3-9-35> 용덕저수지 수위-내용적

저수위 (m)	저수량 (m ³)	저수율 (%)
2.50	0	0.0
3.00	6	0.6
3.50	22	2.3
4.00	47	5.0
4.50	82	8.6
5.00	125	13.1
5.50	183	19.3
6.00	259	27.3
6.50	345	36.4
7.00	437	46.1
7.50	534	56.3
8.00	635	66.9
8.50	737	77.7
9.00	842	88.7
9.50	949	100.0

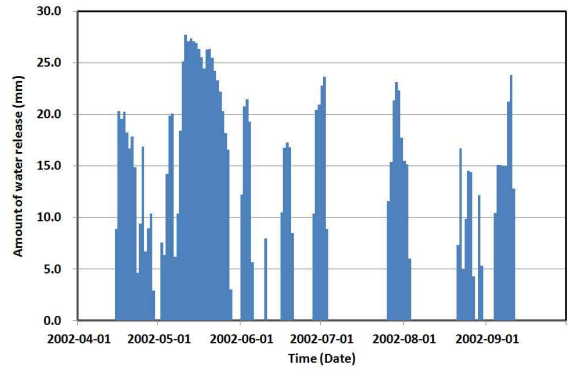
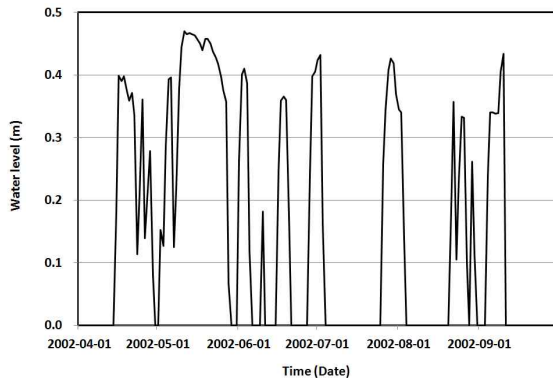
(나) 지배관측소

용덕저수지 저수지 저수위 거동 및 관개지구의 필요수량을 모의하기 위하여 인접한 기상관측소를 파악한 결과, 지배기상관측소로 수원기상관측소를 선정하였다. 용덕저수지의 유입량과 농업용수 공급량 모의에 필요한 강우자료는 용덕강우관측소 자료를 사용하였다.

(다) 실측자료 분석

용덕저수지 관개지구에 대한 농업용수 공급량을 분석하기 위하여 용수간선에 설치된 수위계로부터 수집된 수위와 유량 자료를 분석하였다. 측정된 수위를 유량으로 환산하

기 위하여 2002년에 수립된 수위-유량곡선 $Q=3.4333H^{1.8711}$ 을 적용하였다. (그림 3-9-32)와 (그림 3-9-33)은 2002년의 용덕저수지 용수간선의 일평균 수위와 용덕저수지에서 공급된 일별 유량을 나타낸 것이다.

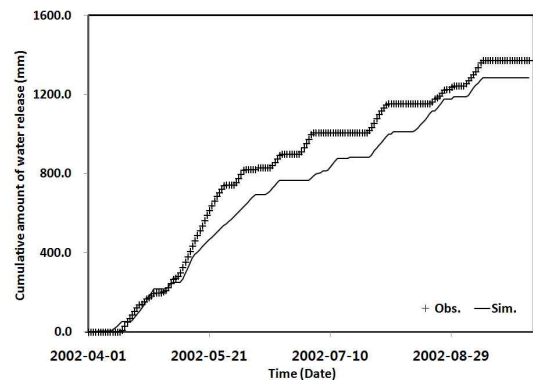
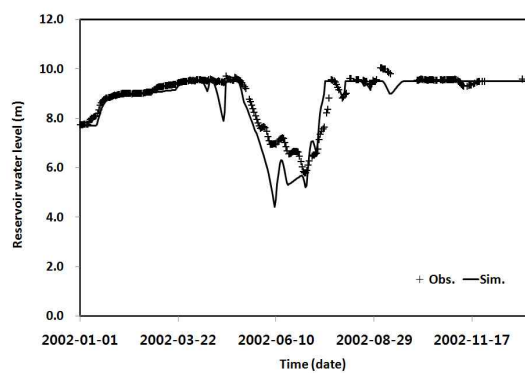


(그림 3-9-32) 용덕저수지 용수간선 일평균 수위

(그림 3-9-33) 용덕저수지 용수간선 일평균 유량

(라) 자료 품질 확인

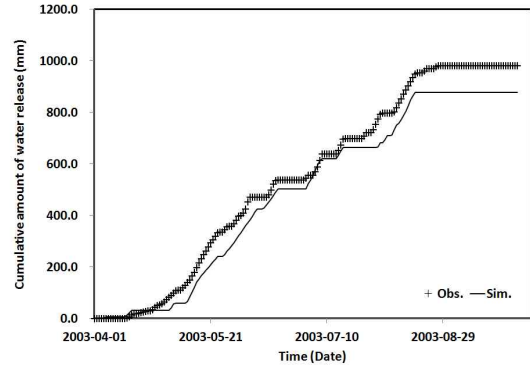
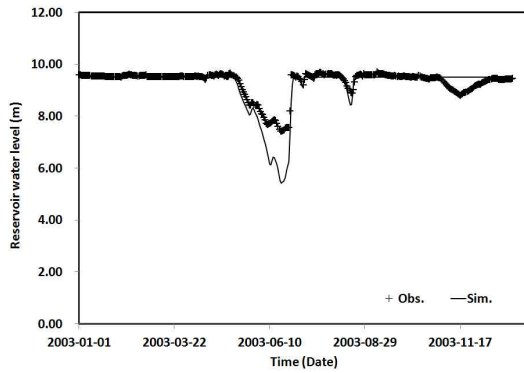
저수지 저수위와 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 2002년부터 2005년까지 4개년의 저수지 저수위와 농업용수 공급량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-34) ~ (그림 3-9-37)은 2002년~2005년의 저수지 저수위 모의결과와 실측자료, 농업용수 공급량 모의결과와 실측자료를 각각 비교한 것이다. 저수지 저수위 실측자료를 모의결과와 비교해 보면 두 자료가 대체로 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과를 비교해 보면 두 자료가 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. <표 3-9-36>과 같이 대상기간동안 저수지 저수위 실측자료와 모의결과의 RMSE는 0.44~0.65 m의 범위를 나타냈으며, 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -10.6~-4.8 %의 범위를 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 용덕저수지의 저수위 및 농업용수 공급량 측정자료의 품질은 우수한 것으로 판단된다.



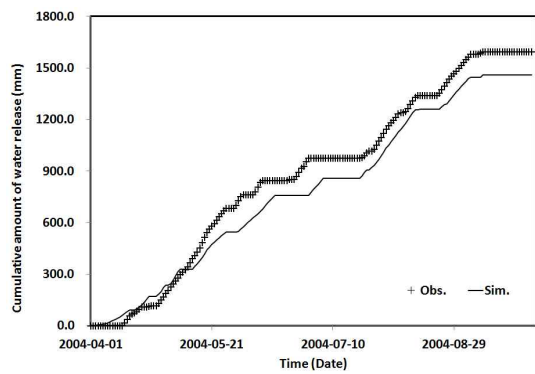
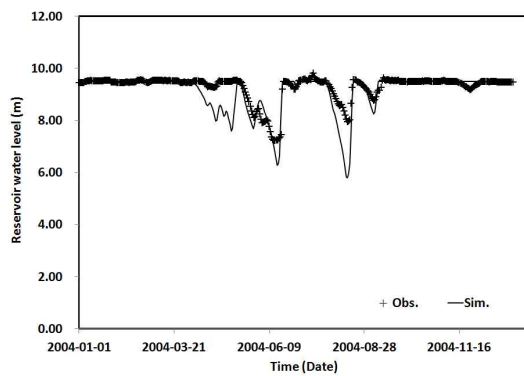
(a) 저수위

(b) 농업용수 공급량

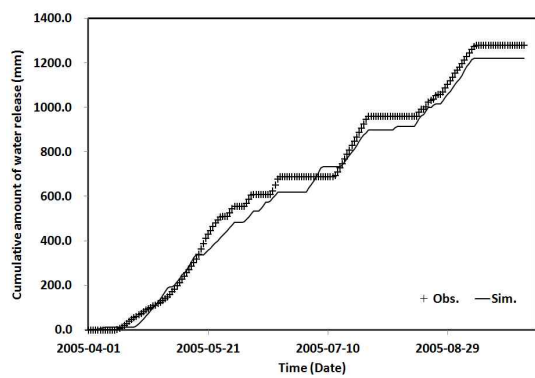
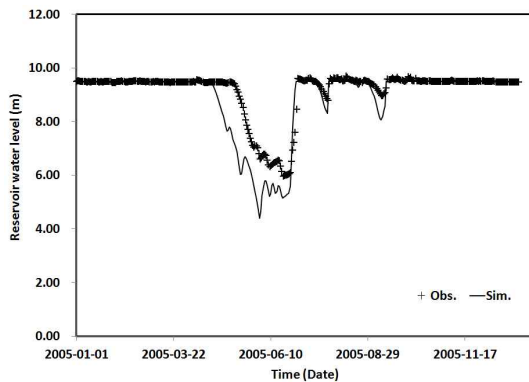
(그림 3-9-34) 2002년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교



(a) 저수위 (b) 농업용수 공급량
 (그림 3-9-35) 2003년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교



(a) 저수위 (b) 농업용수 공급량
 (그림 3-9-36) 2004년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교



(a) 저수위 (b) 농업용수 공급량
 (그림 3-9-37) 2005년 용덕저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

<표 3-9-36> 용덕저수지 모의결과

연도	저수지 저수위 RMSE (m)	농업용수 공급량 상대오차 (%)
2002	0.58	-6.4
2003	0.44	-10.6
2004	0.49	-8.5
2005	0.65	-4.8

(2) 미산저수지

(가) 위치 및 제원

미산저수지는 행정구역상 경기도 안성시 양성면 미산리에 위치하고 있으며, 안성천의 지류인 진위천 상류에 위치하고 있다. 저수지 유역면적은 442 ha이며, 유효저수량은 1,698천 m³이며, 관개면적은 199.0 ha이다. 만수위는 16.5 m이며, 홍수위는 19.0 m이며, 자유월류식이다. <표 3-9-37>은 미산저수지의 수위-내용적 관계를 나타낸 것이다.

<표 3-9-37> 미산저수지 수위-내용적

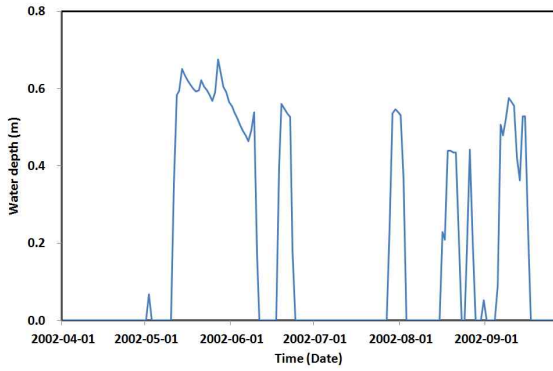
저수위 (m)	저수량 (천 m ³)	저수율 (%)
2.0	58	3.42
3.0	97	5.71
4.0	145	8.54
5.0	205	12.1
6.0	277	16.3
7.0	361	21.3
8.0	455	26.8
9.0	558	32.9
10.0	670	39.5
11.0	795	46.8
12.0	934	55.0
13.0	1084	63.8
14.0	1245	73.3
15.0	1417	83.5
16.0	1602	94.3
16.5	1698	100.0
17.0	1788	105.9

(나) 주요관측소

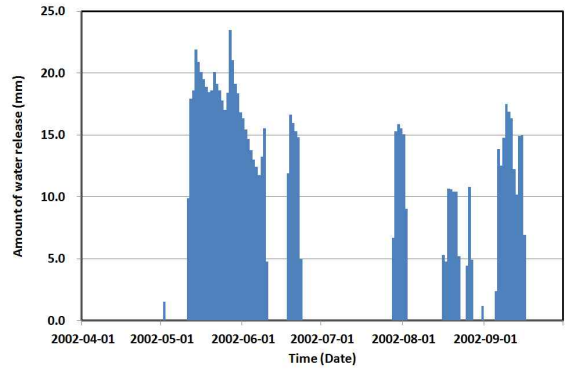
미산저수지 저수지 저수위 거동 및 관개지구의 필요수량을 모의하기 위하여 인접한 기상관측소를 파악한 결과, 지배기상관측소로 수원기상관측소를 선정하였다. 미산저수지의 유입량과 농업용수 공급량 모의에 필요한 강우자료는 미산강우관측소 자료를 사용하였다.

(다) 실측자료 분석

미산저수지 관개지구에 대한 농업용수 공급량을 분석하기 위하여 용수간선에 설치된 수위계로부터 수집된 수위와 유량 자료를 분석하였다. 측정된 수위를 유량으로 환산하기 위하여 2005년에 수립된 수위-유량곡선 $Q=1.1084H^{1.8338}$ 을 적용하였다. (그림 3-9-38)과 (그림 3-9-39)는 2002년의 미산저수지 용수간선의 일평균 수위와 미산저수지에서 공급된 일별 유량을 나타낸 것이다.



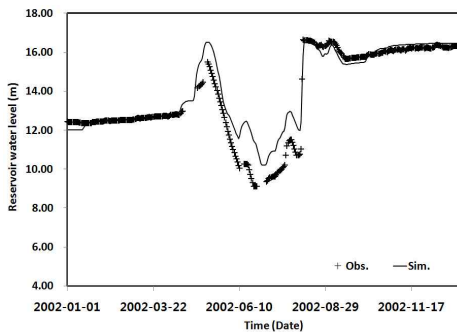
(그림 3-9-38) 미산저수지 용수간선 일평균 수위



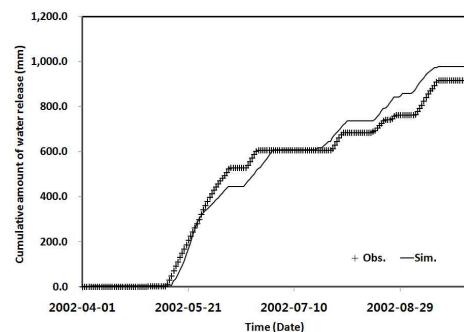
(그림 3-9-39) 미산저수지 용수간선 일평균 유량

(라) 자료 품질 확인

미산저수지 저수위와 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 2002년부터 2005년까지 4개년의 저수지 저수위와 농업용수 공급량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-40)~(그림 3-9-43)은 2002년~2005년의 미산저수지 저수위 모의결과와 실측자료, 농업용수 공급량 모의결과와 실측자료를 각각 비교한 것이다. 저수지 저수위 실측자료를 모의결과와 비교해 보면, 2005년을 제외하고 두 자료가 대체로 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 2005년 하반기에 저수지 관리 목적으로 방류를 실시함에 따라 저수위가 저하되었으며, 모형에서는 이를 고려하지 않았다. 따라서 실측 저수위 자료를 사용할 때 주의해야 할 것으로 사료된다. 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과를 비교해 보면, 2005년을 제외하고 두 자료가 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 2005년에는 결측자료가 발생한 것으로 판단되며, 이 기간동안의 실측자료를 사용하는데 주의해야 할 것으로 사료된다. <표 3-9-38>과 같이 대상기간 동안 저수지 저수위 실측자료와 모의결과의 RMSE는 0.32~1.44 m의 범위를 나타냈으며, 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과의 상대오차는 6.8~108.8 %의 범위를 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 2005년을 제외하고 미산저수지의 저수위 및 농업용수 공급량 측정자료 품질은 우수한 것으로 판단된다.

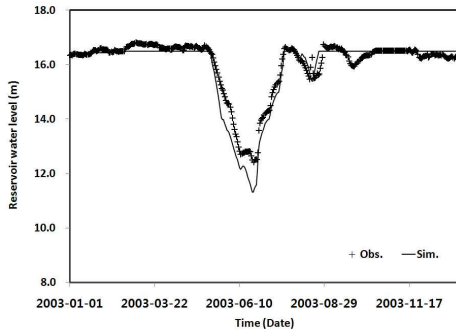


(a) 저수위

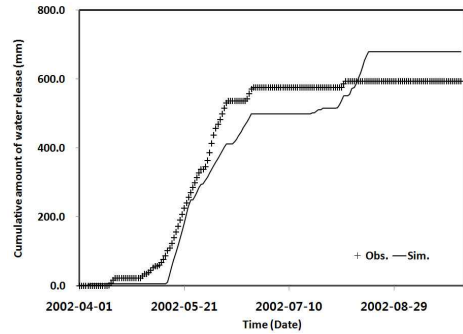


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-40) 2002년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

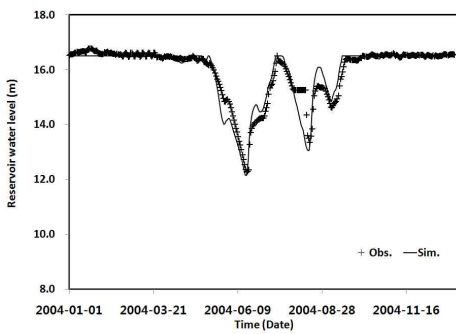


(a) 저수위

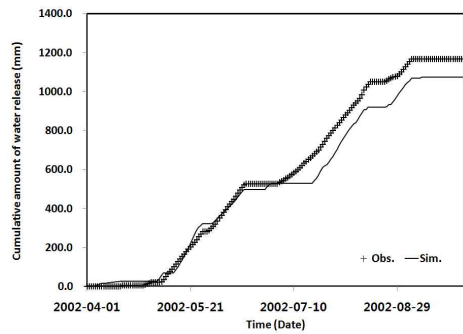


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-41) 2003년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

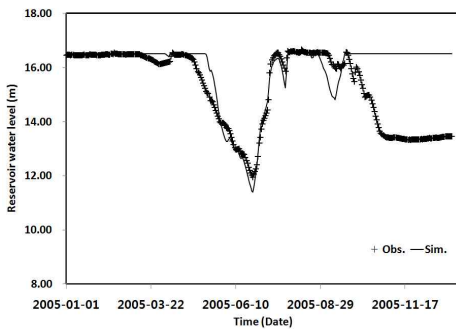


(a) 저수위

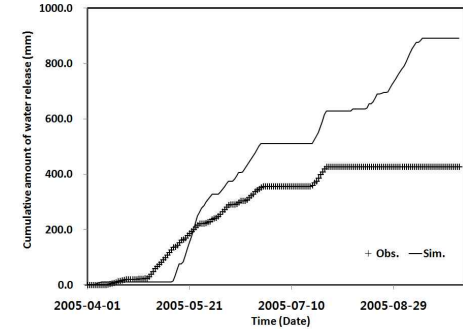


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-42) 2004년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교



(a) 저수위



(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-43) 2005년 미산저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

<표 3-9-38> 미산저수지 모의결과

연도	저수지 저수위 RMSE (m)	농업용수 공급량 상대오차 (%)
2002	0.75	6.8
2003	0.37	14.3
2004	0.32	8.0
2005	1.44	108.8

(3) 이동저수지

(가) 위치 및 제원

이동저수지는 행정구역상 경기도 용인시 처인구 이동면 어비리에 위치하고 있으며, 안성천의 지류인 진위천 상류에 위치하고 있다. 저수지 유역면적은 9,300 ha이며, 유효저수량은 20,949.7천 m³이며, 관개면적은 2,063.0 ha이다. 만수위는 11.7 m이며, 홍수위는 14.19 m이며, 텐터게이트를 사용하여 조작한다. <표 3-9-39>는 이동저수지의 수위-내용적 관계를 나타낸 것이다.

<표 3-9-39> 이동저수지 수위-내용적

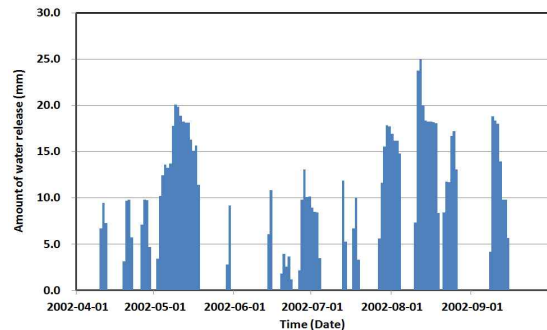
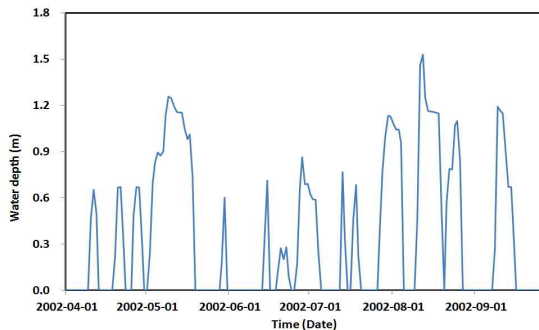
수위 (m)	저수량 (m ³)	비율 (%)
0.00	43.3	0.2
1.00	389.9	1.9
2.00	1,044.0	5.0
3.00	1,948.6	9.3
4.00	3,047.6	14.5
5.00	4,382.7	20.9
6.00	5,998.7	28.6
7.00	7,945.1	37.9
8.00	10,288.7	49.1
9.00	12,962.7	61.9
10.00	15,829.2	75.6
11.00	18,821.2	89.8
11.70	20,949.7	100.0

(나) 주요관측소

이동저수지 저수지 저수위 거동 및 관개지구의 필요수량을 모의하기 위하여 인접한 기상 관측소를 파악한 결과, 지배기상관측소로 수원기상관측소를 선정하였다. 이동저수지의 유입량 및 농업용수 공급량 모의에 필요한 강우자료는 이동강우관측소 자료를 사용하였다.

(다) 실측자료 분석

이동저수지 관개지구에 대한 농업용수 공급량을 분석하기 위하여 용수간선에 설치된 수위계로부터 수집된 수위 및 유량 자료를 분석하였다. 측정된 수위를 유량으로 환산하기 위하여 2005년에 수립된 수위-유량곡선 $Q=3.6851H^{1.1372}$ 을 적용하였다. (그림 3-9-44)와 (그림 3-9-45)는 2002년의 이동저수지의 용수간선의 일평균 수위와 이동저수지에서 공급된 일별 유량을 나타낸 것이다.



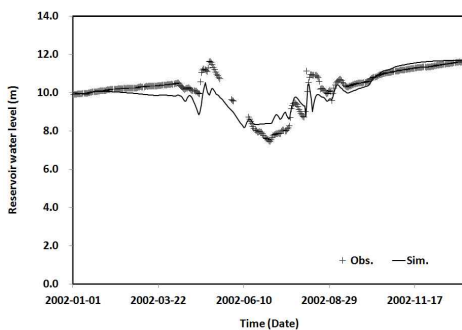
(그림 3-9-44) 이동저수지 용수간선 일평균 수위 (그림 3-9-45) 이동저수지 용수간선 일평균 유량

(라) 자료 품질 확인

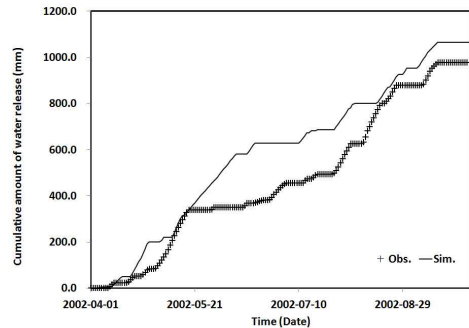
저수지 저수위와 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 2002년부터 2005년까지 4개년의 저수지 저수위와 농업용수 공급량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-46)~(그림 3-9-49)은 2002년~2005년의 저수지 저수위 모의결과와 실측자료, 농업용수 공급량 모의결과와 실측자료를 각각 비교한 것이다. 저수지 저수위 실측자료를 모의결과와 비교해 보면, 두 자료가 대체로 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과를 비교해 보면, 2002년을 제외하고 두 자료가 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 2002년에는 결측자료가 발생한 것으로 판단되며, 이 기간동안의 실측자료를 사용하는데 주의해야 할 것으로 사료된다. <표 3-9-40>과 같이 대상기간동안 저수지 저수위 실측자료와 모의결과의 RMSE는 0.54~1.05 m의 범위를 나타냈으며, 저수지 농업용수 공급량 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -7.6~8.9 %의 범위를 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 미산저수지의 저수위 및 농업용수 공급량 측정자료의 품질은 우수한 것으로 판단된다.

<표 3-9-40> 이동저수지 모의결과

연도	저수지 저수위 RMSE (m)	농업용수 공급량 상대오차 (%)
2002	0.54	8.9
2003	0.62	-7.6
2004	0.92	7.6
2005	1.05	5.8

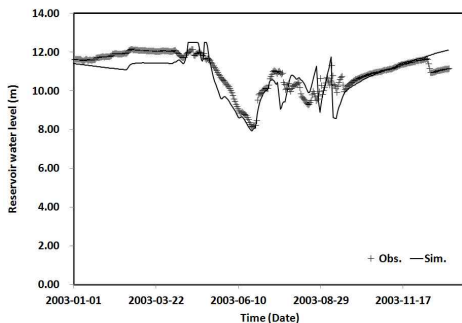


(a) 저수위

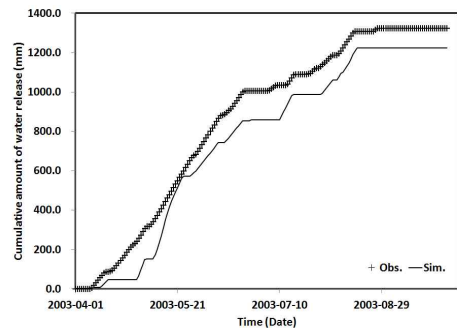


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-46) 2002년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

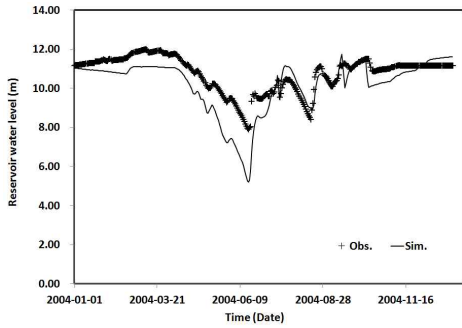


(a) 저수위

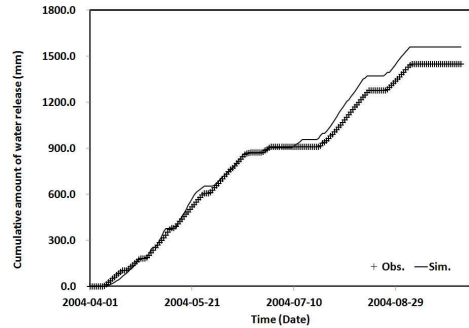


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-47) 2003년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

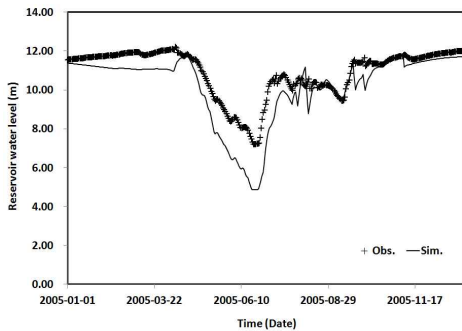


(a) 저수위

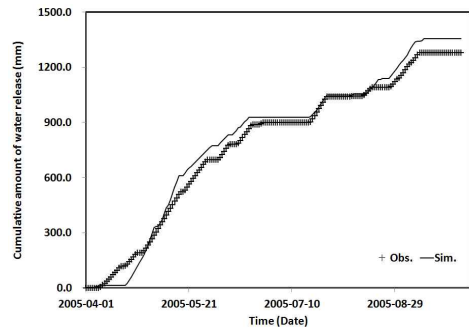


(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-48) 2004년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교



(a) 저수위



(b) 농업용수 공급량

(그림 3-9-49) 2005년 이동저수지 저수위 및 농업용수 공급량 모의결과 비교

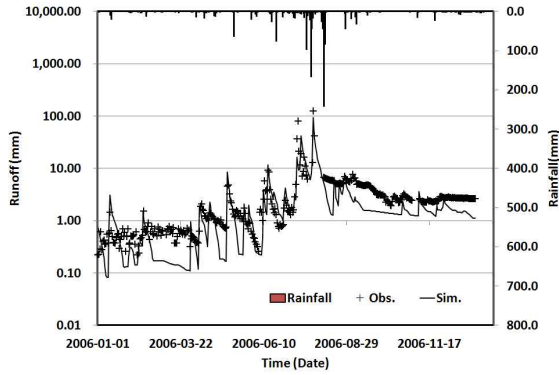
다. 하천유량 자료 품질 평가

본 연구에서는 이동지구내 하천유량 측정지점의 유량 자료의 품질을 확인하기 위하여 수정 Tank 모형을 이용하여 모의한 결과와 실측자료를 비교하였다. 본 연구에서 선정한 Tank 모형은 수정 3단 Tank 모형이다.

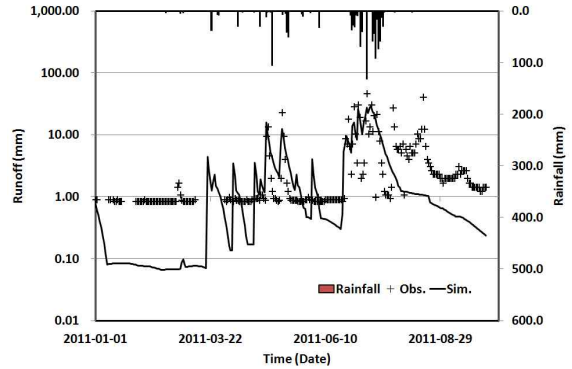
(1) 미산교 수위관측소

미산교 수위관측소는 미산저수지 유입량을 측정하기 위하여 설치된 곳이며, 유역면적은 262.4 ha이다. 미산교 수위관측소의 유출량을 모의하기 위하여 증발산량자료는 수원 기상관측소의 자료를 사용하였으며, 강우자료는 미산강우관측소 자료를 사용하였다.

미산교 수위관측소의 유량자료의 품질을 확인하기 위하여 유출량 자료가 가용한 2006년과 2011년에 대하여 유출량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-50(a))는 2006년 미산교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 28.1 %, RMSE는 4.8 mm였으며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-50(b))는 2011년 미산교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -23.0 %, RMSE는 4.9 mm였으며, 실측자료와 모의결과가 다소 차이를 나타냈다. 이는 2011년에 미산강우관측소 강우자료가 측정되지 않아서 이동강우관측소의 자료를 사용했기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터 2006년 미산교 수위관측소의 유량자료의 품질은 우수한 것으로 판단된다.



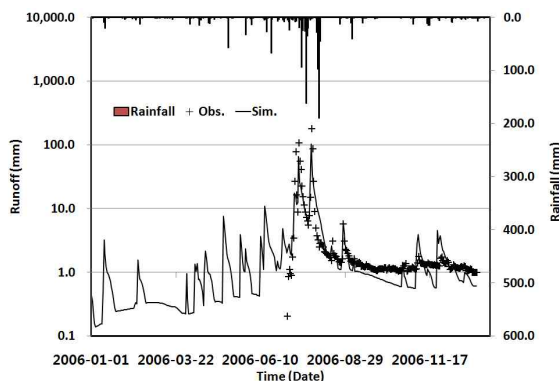
(a) 2006년
(그림 3-9-50) 미산교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교



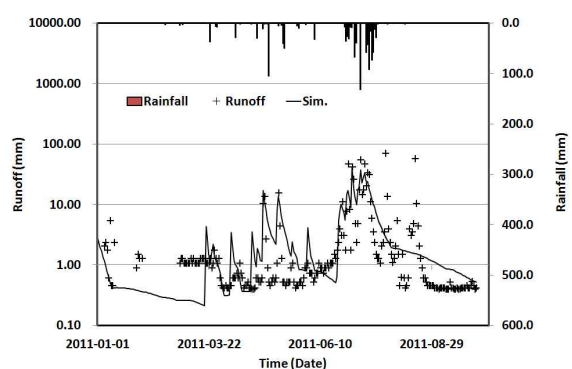
(2) 묵방교 수위관측소

묵방교 수위관측소는 용덕저수지 유입량을 측정하기 위하여 설치된 곳이며, 유역면적은 1,112.8 ha이다. 묵방교 수위관측소의 유출량을 모의하기 위하여 증발산량자료는 수원기상관측소의 자료를 사용하였으며, 강우자료는 용덕강우관측소 자료를 사용하였다.

묵방교 수위관측소의 유량자료 품질을 확인하기 위하여 유출량 자료가 가용한 2006년과 2011년에 대하여 유출량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-51(a))는 2006년 묵방교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -27.2 %, RMSE는 9.4 mm였으며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-51(b))는 2011년 묵방교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -4.7 %, RMSE는 7.0 mm였으며, 실측자료와 모의결과가 유사한 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 2006년, 2011년의 묵방교 수위관측소 유량 자료는 결측구간이 있으나, 유량자료의 품질은 양호한 것으로 판단된다.



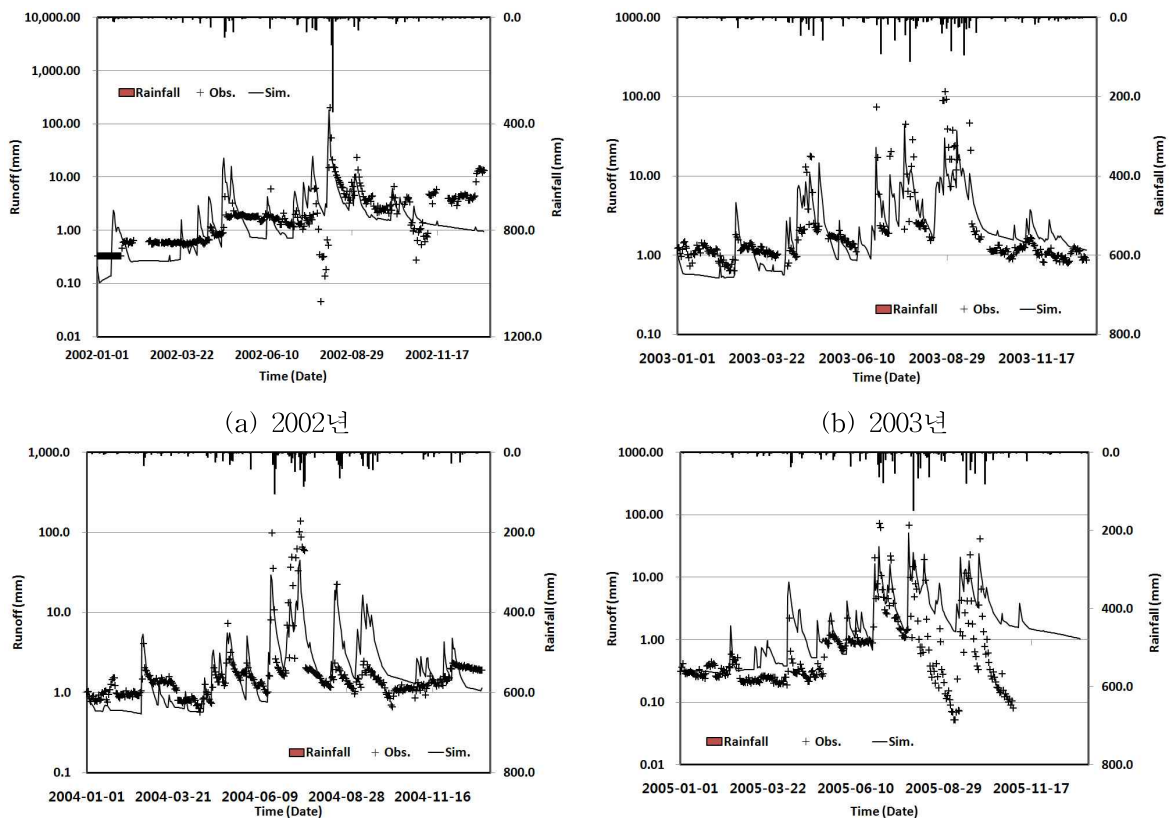
(a) 2006년
(그림 3-9-51) 묵방교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교



(3) 덕성교 수위관측소

덕성교 수위관측소는 용덕저수지 하류에 위치하며, 이동저수지 유입량을 측정하기 위하여 설치된 곳이다. 유역면적은 4,244 ha이다. 덕성교 수위관측소의 유출량을 모의하기 위하여 증발산량자료는 수원기상관측소의 자료를 사용하였으며, 강우자료는 용덕강우관측소 자료를 사용하였다.

덕성교 수위관측소의 유출자료의 품질을 확인하기 위하여 유출량 자료가 가용한 2002년~2005년에 대하여 유출량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-52(a))는 2002년 덕성교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 10.0 %, RMSE는 13.0 mm였으며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-52(b))는 2003년 덕성교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -35.9 %, RMSE는 11.6 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-52(c))는 2004년 덕성교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -28.1 %, RMSE는 10.7 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-52(d))는 2005년 덕성교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -51.2 %, RMSE는 5.3 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 2002년~2005년 덕성교 수위관측소 유출 자료의 품질은 양호한 것으로 판단된다.

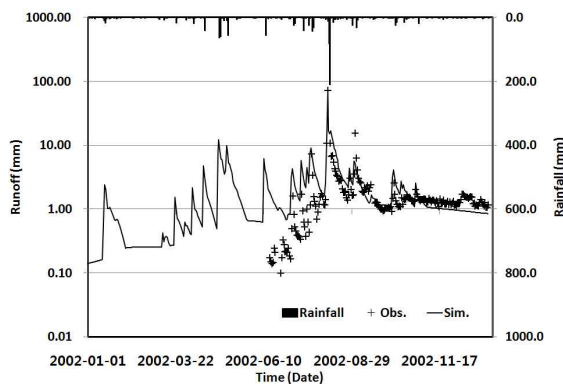


(그림 3-9-52) 덕성교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교

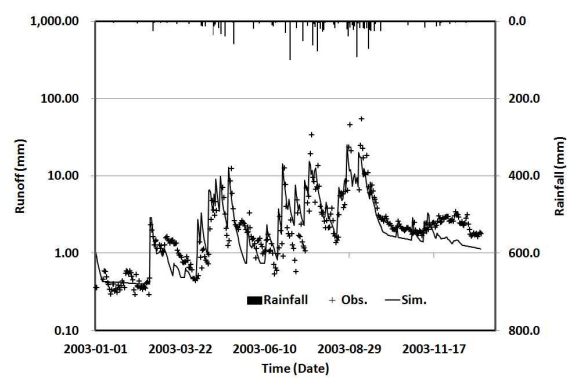
(4) 재인교 수위관측소

재인교 수위관측소는 미산저수지 하류에 위치하며, 이동저수지 유입량을 측정하기 위하여 설치된 곳이다. 유역면적은 1,600 ha이다. 재인교 수위관측소의 유출량을 모의하기 위하여 증발산량자료는 수원기상관측소의 자료를 사용하였으며, 강우자료는 미산강우관측소 자료를 사용하였다.

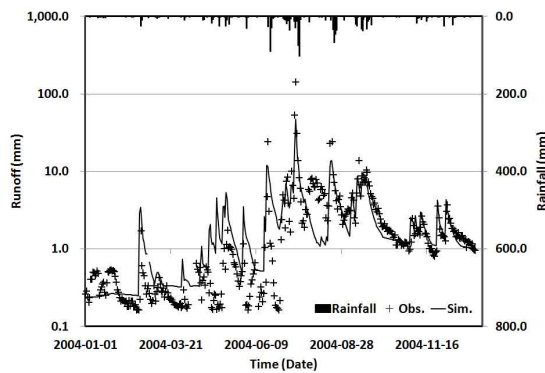
재인교 수위관측소의 유출자료의 품질을 확인하기 위하여 유출량 자료가 가용한 2002년~2005년에 대하여 유출량을 모의하여 실측자료와 비교하였다. (그림 3-9-53(a))는 2002년 재인교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 28.9 %, RMSE는 1.8 mm였으며, 실측치와 모의치가 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-53(b))는 2003년 재인교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -9.3 %, RMSE는 3.9 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-53(c))는 2004년 재인교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 -15.6 %, RMSE는 5.7 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. (그림 3-9-53(d))는 2005년 재인교 유출량을 모의한 결과를 실측치와 비교한 것이다. 실측자료와 모의결과의 상대오차는 5.1 %, RMSE는 2.1 mm였으며, 실측자료와 모의결과의 유사한 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과로부터 2002년~2005년 재인교 수위관측소 유출 자료의 품질은 양호한 것으로 판단된다.



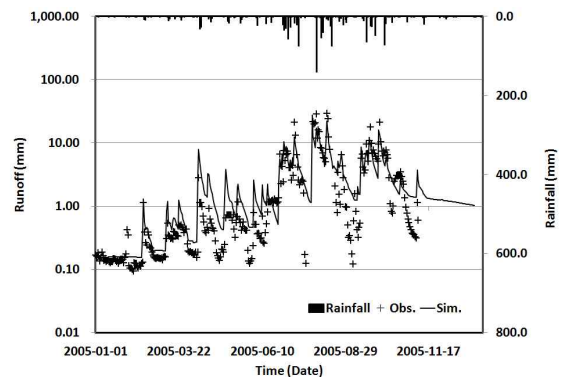
(a) 2002년



(b) 2003년



(c) 2004년



(d) 2005년

(그림 3-9-53) 재인교 하천수위관측소 실측자료와 모의결과 비교

라. 동진지구 자료품질 평가

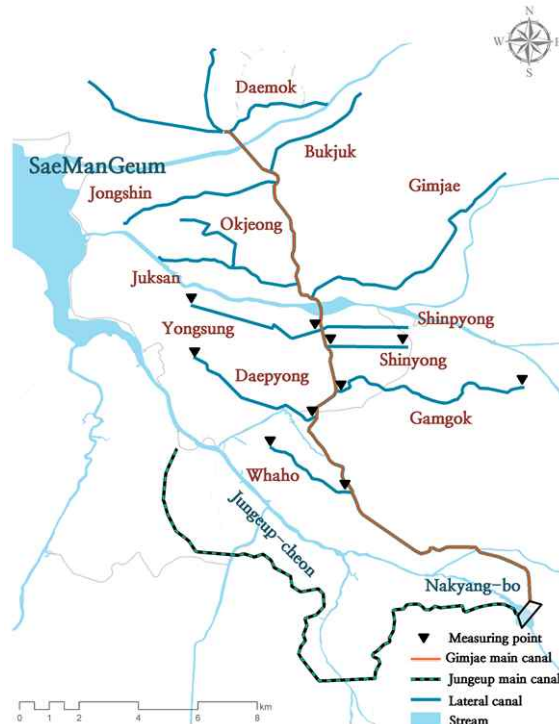
대단위 농업용수 관개지구인 동진지구 내의 수위자료는 낙양보지점에 취수하여 김제간선과 정읍간선으로 나뉜다. 본 연구에서는 김제간선을 중심으로 2012년 관개기간부터, 즉 4월부터 수위를 측정하였다.

(1) 김제간선 농업용수 공급 체계

본 연구는 한국농어촌공사에서 구축한 자동수위계측 시스템을 통해 용수 수급상황이 실시간으로 모니터링이 되고 있는 동진지구 김제간선을 대상지역으로 선정하였다. 동진강 유역의 농업용수는 섬진강 운암제의 농업용수 취수구를 통해 방류되어 동진강 도수로와 낙양보에서 정읍 및 김제간선을 통해 농업용수로 공급된다. 동진강 유역 관개면적과 비교하여 절대적으로 농업용수가 부족하기 때문에 김제간선에서는 농업용수를 관행에 따라 요일별로 간단관개를 실시하고 있다.

본 연구에서는 동진지구 김제간선 상류 5개 용수지선을 계측지점으로 선정하였다. 본 지구는 전북대학교 (최진규 등, 2012)에서 동진지구 내 총 50여개 지점에서 수위-유량 곡선 관계식을 산정한 결과를 활용하였으며, 그 중 각 지선별 시점부와 말단부의 데이터가 존재하고, 데이터의 품질이 양호한 지점을 최종 선별하였다. 그 중 화호, 대평, 감곡, 용성, 종신 등 총 5개 지선에서의 자료를 구축하였다. 또한 일부 지점에서는 자동수위계가 2013년 후반기에 설치되어 활용할 수 있는 자료의 구득이 어려웠으며, 향후 자료의 축적을 통하여 좀 더 광범위한 지역에서의 농업용수 공급을 평가할 계획이다.

(그림 3-9-54)는 선정된 지선과 그 계측지점을 보여주고 있으며, <표 3-9-41>은 동진지구 농업용수 공급체계 현황을 보여주고 있다. 화호지선과 대평지선은 목-일요일, 감곡지선은 금-월요일, 용성지선은 화-금요일, 종신지선은 월-목요일에 농업용수 공급을 수행하고 있다.



(그림 3-9-54) 동진지구 관개수로 (간선 및 지선) 및 계측지점 현황 (남원호 등, 2013)

<표 3-9-41> 동진지구 관개면적 및 농업용수 공급체계 현황 (남원호 등, 2013)

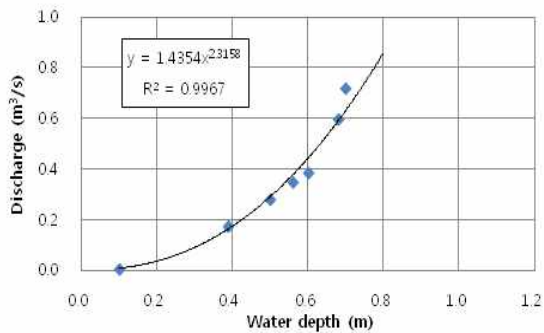
지구	지선	관개면적 (ha)	농업용수 공급	지구	지선	관개면적 (ha)	농업용수 공급
상류	화호	415.9	목 - 일	하류	죽산	576.3	월 - 목
	대평	1,008.0	목 - 일		종신	332.0	월 - 목
	감곡	823.0	금 - 월		대목	275.2	월 - 목
	신용	212.7	금 - 일		능제	208.6	금 - 일
	신평	153.4	금 - 일		월미	72.5	월 - 목
	용성	682.5	수 - 금		진봉	2,015.0	월 - 목
	김제	2,691.0	월 - 목		광활	811.8	금 - 일

(2) 김제간선 수위-유량 관계곡선

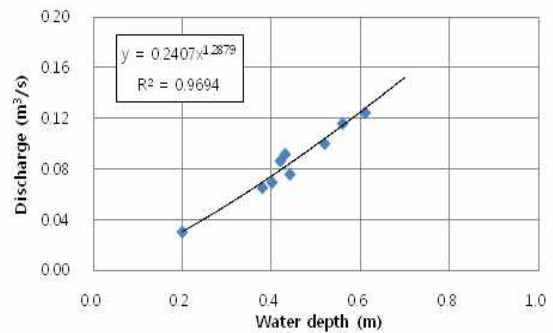
대상지구 내 수위-유량 관계 곡선은 수로단면 조사, 수위 및 수로 경사 조사, 그리고 유속측정을 통하여 산정하였다. 유속 측정은 수면폭 및 수심별 측정방법을 달리하여 정확성을 제고하였으며, <표 3-9-42>에 각 지점별 수위-유량 관계식을 정리하였다. (그림 3-9-55)는 그중 화호 및 대평 지점에 대한 수위-유량 관계 곡선을 부여주고 있다.

<표 3-9-42> 측정지점별 수위-유량 관계식 산정

측정지점 (시점, 종점)	수로측정범위 (m)	수위-유량 관계식	결정계수 (R2)	비 고
화호시점	0 - 0.70	$Q = 1.4354H^{2.3158}$	0.9967	
화호말단	0 - 0.61	$Q = 0.2407H^{1.2879}$	0.9694	
대평시점	0 - 1.20	$Q = 3.184H^{1.5175}$	0.9991	
대평말단	0 - 0.98	$Q = 0.4818H^{1.9802}$	0.9878	
감곡시점	0 - 1.25	$Q = 1.5354H^{2.3553}$	0.9871	
감곡말단	0 - 0.95	$Q = 0.2062H^{0.6597}$	0.9894	
신용시점	0 - 0.84	$Q = 1.23867H^{1.0231}$	0.9999	
신용말단	0 - 0.80	$Q = 0.1135H^{0.9854}$	0.9614	
용성시점	0 - 0.95	$Q = 1.6862H^{1.7136}$	0.9962	
용성말단	0 - 1.00	$Q = 0.8019H^{1.5576}$	0.9791	
종신시점	0 - 1.29	$Q = 0.9129H^{4.6303}$	0.9989	
종신말단	0 - 0.60	$Q = 0.3173H^{1.1358}$	0.9986	

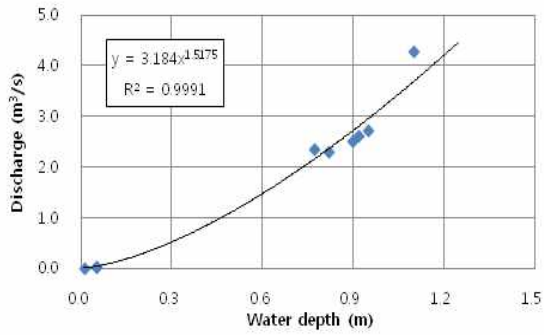


(a) 화호지선 시점

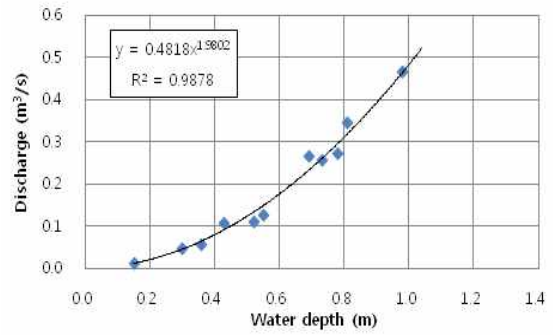


(b) 화호지선 말단

(그림 3-9-55) 지선별 수위-유량 관계곡선 (최진규 등, 2012)



(c) 대평지선 시점

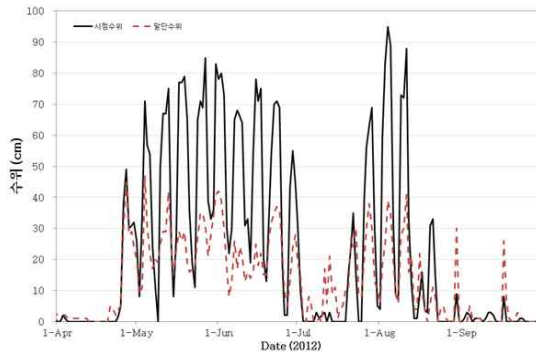


(d) 대평지선 말단

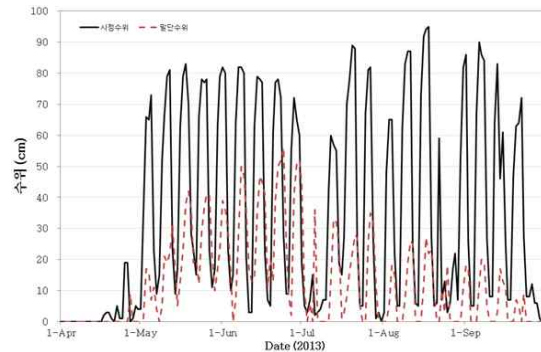
(그림 3-9-55) 지선별 수위-유량 관계곡선 (최진규 등, 2012) (계속)

(3) 김제간선 수위, 유량 및 농업용수 공급량

(그림 3-9-56)~(그림 3-9-60)은 2012년과 2013년 관개기간 동안 화호, 대평, 감곡, 용성, 종신 지선에서의 시점과 말단에서의 수위 변화를 비교한 것이다. 각 지선별 관개용수 부족에 따른 관행 운영관리에 따라 간단관개가 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 일부 지점에서 시점과 말단에서의 수위가 역전하는 경우는 관개수로의 규격에 따른 차이로 상대적인 비교는 의미가 없으며, 수위-유량 관계식으로 환산하여 각 지선에서의 농업용수 공급량을 산정하여 이를 비교할 수 있다.

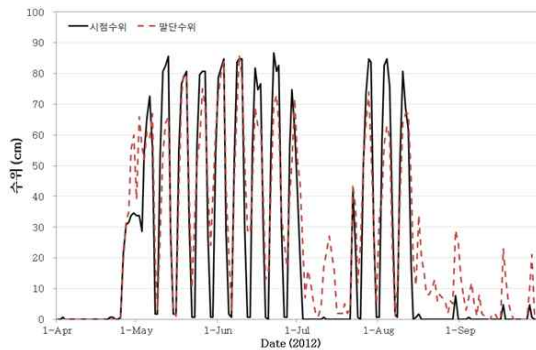


(a) 2012년

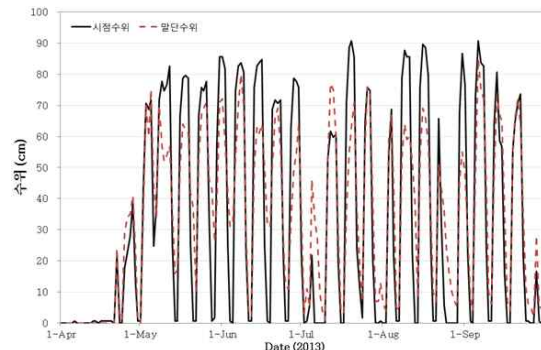


(b) 2013년

(그림 3-9-56) 동진지구내 화호지선 시점 및 말단 수위 비교

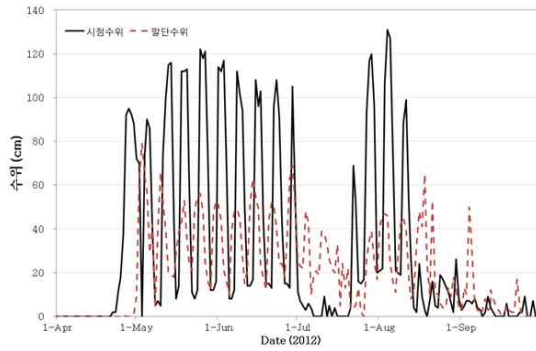


(a) 2012년

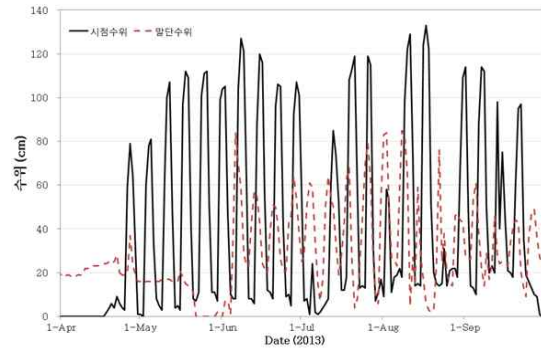


(b) 2013년

(그림 3-9-57) 동진지구내 대평지선 시점 및 말단 수위 비교

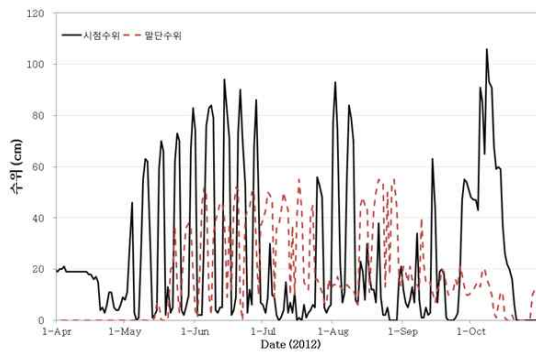


(a) 2012년

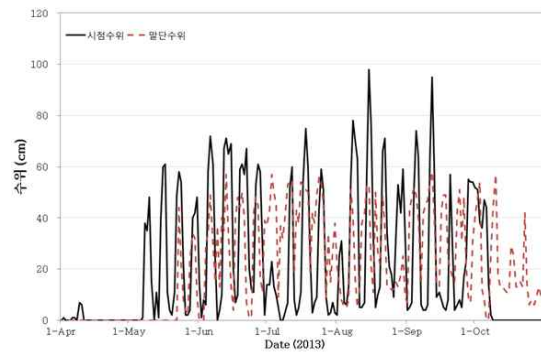


(b) 2013년

(그림 3-9-58) 동진지구내 감곡지선 시점 및 말단 수위 비교

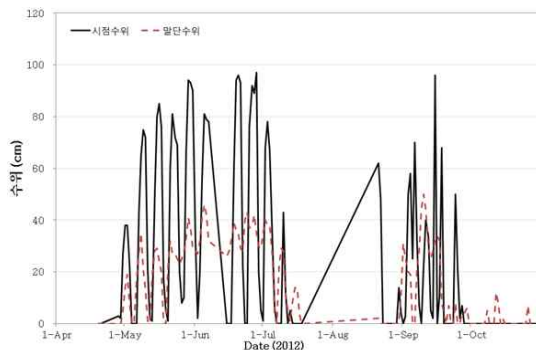


(a) 2012년

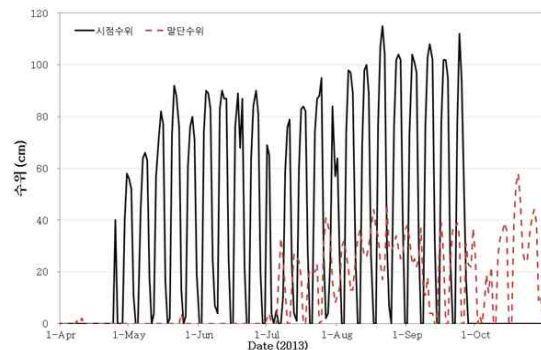


(b) 2013년

(그림 3-9-59) 동진지구내 용성지선 시점 및 말단 수위 비교



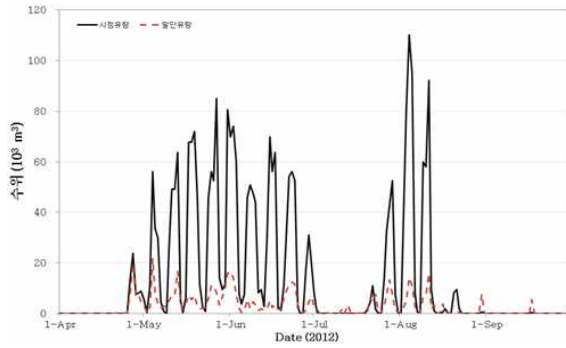
(a) 2012년



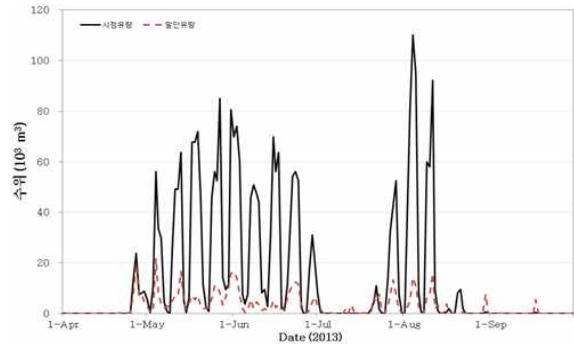
(b) 2013년

(그림 3-9-60) 동진지구내 종신지선 시점 및 말단 수위 비교

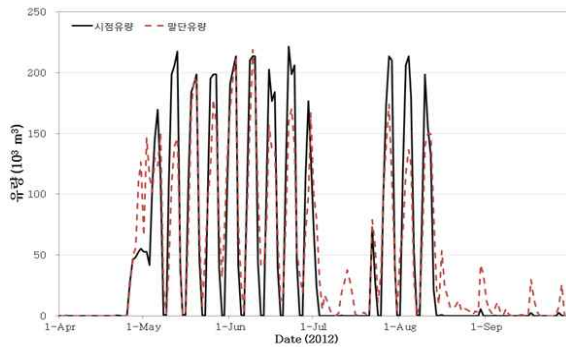
(그림 3-9-61)~(그림 3-9-65)는 2012년과 2013년 관개기간 동안 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 지선에서의 시점과 말단에서의 유량 변화를 비교한 것이다. 대평 지선의 경우 시점과 말단의 유량 차이가 가장 작게 나타났으며, 다른 지선의 경우 시점과 말단의 유량 차이가 크게 나타났다. 특히 하류부에 위치한 종신지선의 경우 관개기간에 따라 말단부의 낮은 수위, 즉 작은 유량이 많이 관측되었다. 이는 동진지구 내 가장 하류부에 위치하여 지역 특성상 충분한 농업용수 공급이 이루어지지 않고 있다는 것을 보여주고 있다.



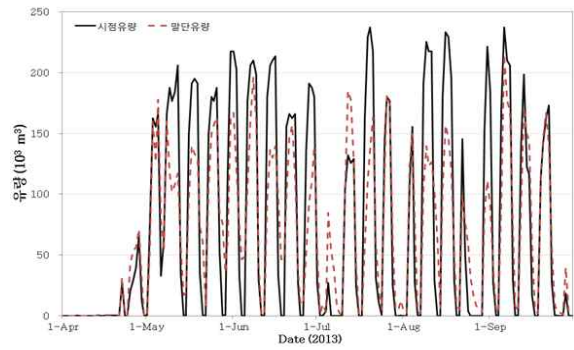
(a) 2012년
(그림 3-9-61) 동진지구내 화호지선 시점 및 말단 유량 비교



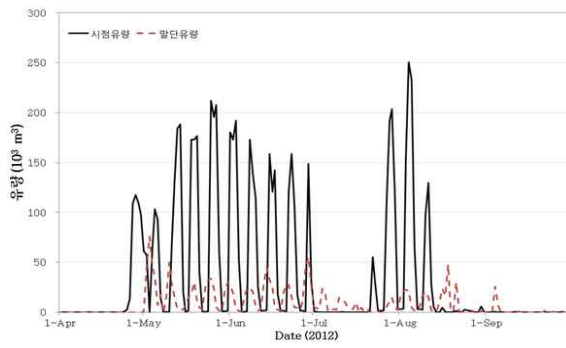
(b) 2013년



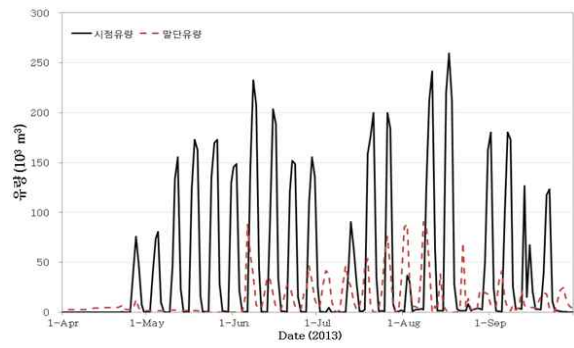
(a) 2012년
(그림 3-9-62) 동진지구내 대평지선 시점 및 말단 유량 비교



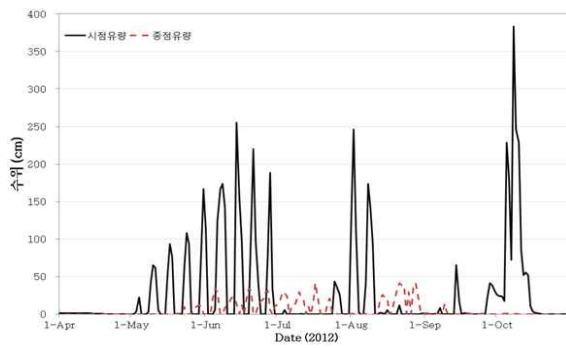
(b) 2013년



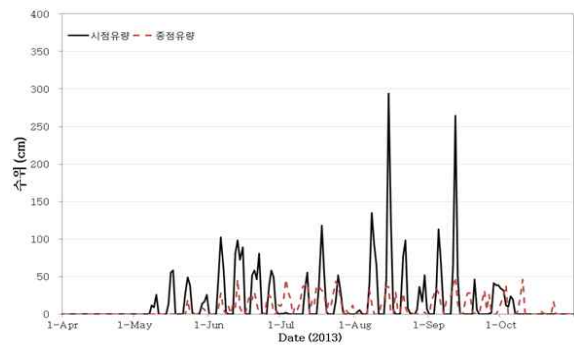
(a) 2012년
(그림 3-9-63) 동진지구내 감곡지선 시점 및 말단 유량 비교



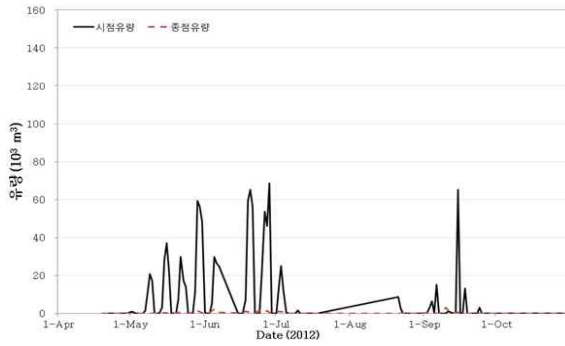
(b) 2013년



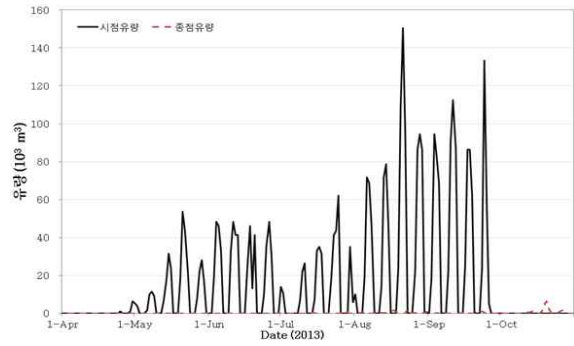
(a) 2012년
(그림 3-9-64) 동진지구내 용성지선 시점 및 말단 유량 비교



(b) 2013년



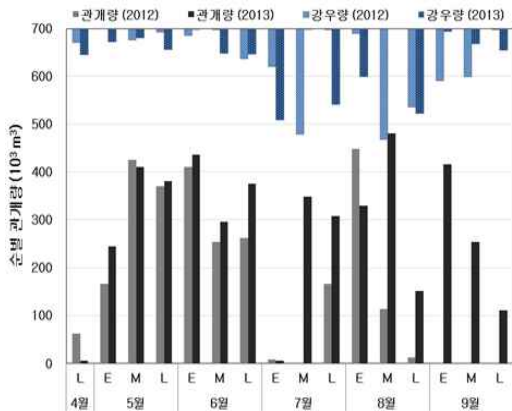
(a) 2012년



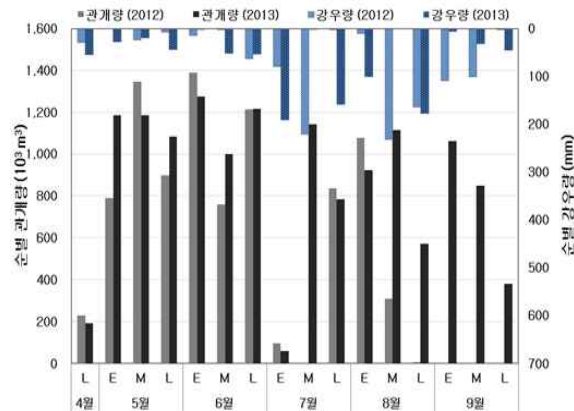
(b) 2013년

(그림 3-9-65) 동진지구내 중신지선 시점 및 말단 유량 비교

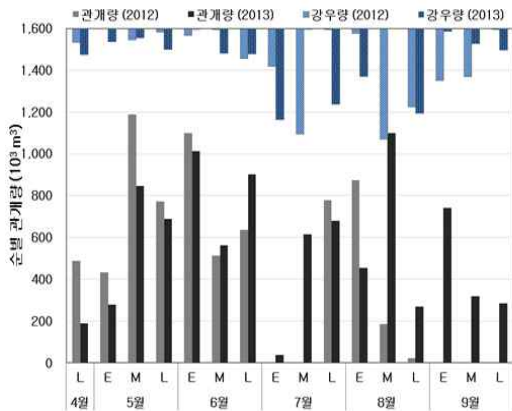
(그림 3-9-66)~(그림 3-9-71)은 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 중신지선에서 2012년과 2013년 관개기 동안 농업용수 공급량 (즉, 각 지선별 시점에서의 관측값)을 비교한 그래프이다. 관개기간 동안 순별 강우량을 비교해 보면 매년 각기 다른 강우 경향을 보여주고 있어 순별 농업용수 공급량이 다르게 나타나고 있다. 대체적으로 2013년 7, 8월이 강우량이 상대적으로 작아 농업용수 공급이 많이 이루어진 것으로 나타났다.



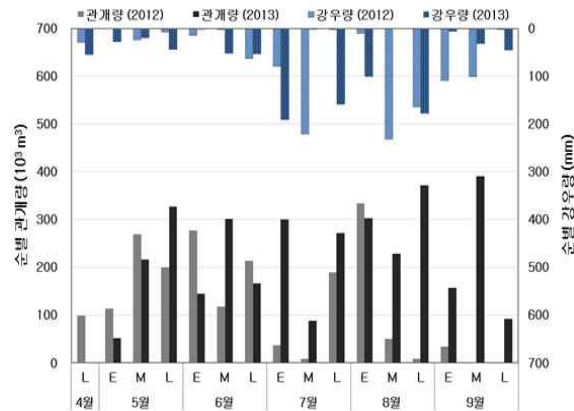
(그림 3-9-66) 동진지구내 화호지선 농업용수 공급량 비교



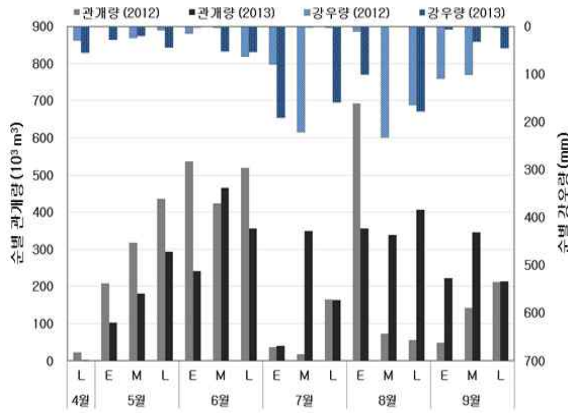
(그림 3-9-67) 동진지구내 대평지선 농업용수 공급량 비교



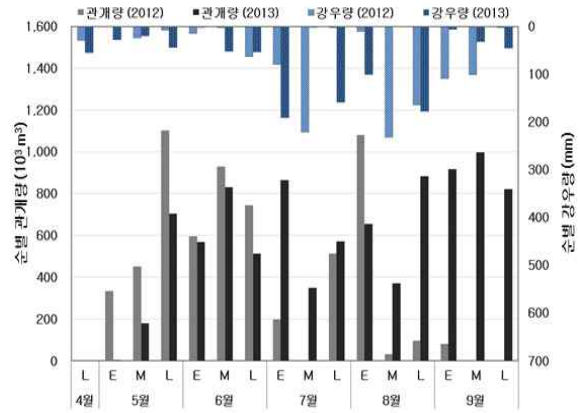
(그림 3-9-68) 동진지구내 감곡지선 농업용수 공급량 비교



(그림 3-9-69) 동진지구내 신용지선 농업용수 공급량 비교



(그림 3-9-70) 동진지구내 용성지선 농업용수 공급량 비교



(그림 3-9-71) 동진지구내 죽산지선 농업용수 공급량 비교

4. 영상기반 수위·유속·유량 현장검증 모듈 개발

농수로의 수리량 (수위, 유속, 유량)은 농업 용수의 효율적인 관리를 위한 가장 기본적인 자료이다. 이들 중에서 수위는 측정이 용이하고 자동화가 많이 이루어져, 우리나라 하천의 주요 지점에서는 많은 경우 자동 수위 관측이 이루어지고 있다. 그러나 농수로에는 고가의 장비를 어디든 설치하기 어려워 자동 측정이 이루어지지 않고 있다.

한편, 하천의 유속 측정은 평수시는 프로펠러식 유속계나 ADCP, 홍수시는 봉부자를 주로 이용하고 있어, 지속적인 관측이 어려운 상황이다. 물론 H-ADCP에 의한 자동 유량 관측이 이루어지고 있으나, 여전히 일정 부분 한계가 있다. 농수로의 경우 하천에 비해 규모가 작아, 전통적인 프로펠러 유속계나 전자 유속계에 의한 유속 측정이 비교적 용이하다. 그러나 유속 측정은 상당히 고가의 장비를 동원해야 하며, 비전문가가 수행하기는 버거운 작업이다.

이러한 유량 측정을 효율적으로 이런 문제를 해결하기 위한 대안으로 여러 가지 비접촉식 유속 측정법들이 제안되었다. 비접촉식 유속 측정은 전파의 도플러 천이 원리를 이용하는 전파 유속계와 하천 표면 영상을 이용하는 표면영상유속계로 나눌 수 있다. 이 두 가지 방법은 모두 수면에 발생하는 파문(수면파문)이나 부유물을 추적 대상으로 하고 있다.

먼저 전파유속계는 수면에 조사된 전파의 도플러 천이를 잡아내어 조사 지점면의 유속을 구한다. 전파 유속계는 일본(Yamaguchi and Niizato, 1994; Negishi et al., 2014)과 한국(한국수자원공사, 1994, 2010; 김서준 등, 2011)에서 개발되어 있으며, 이들의 성능은 매우 비슷하다. 전파유속계는 파문의 이류를 도플러 천이의 효과를 이용하여 계측한다.

다른 하나의 대표적인 비접촉 측정법이 영상을 이용하는 방법이다. 표면영상유속계 측정법(Surface Image Velocimetry)은 입자영상유속계측법(PIV, Particle Image Velocimetry)의 유속 산정 원리(Raffel et al., 2007)를 기초로, 한 쌍의 영상을 이용하여 하천 표면의 2차원 유속 분포를 계측하는 방법이다. 이 방법은 PIV 기법을 하천 표면이라는 큰 규모에 적용했다는 의미에서 Ettema et al. (1997)이 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)라고 이름을 붙였다. 국내에서는 장치의 특성인 표면 영상을 이용하여 유속을 측정한다는 의미에 보다 충실하기 위해 표면영상유속계측

법이라 하고, 이 기법으로 유속을 측정하는 장비는 표면영상유속계(SIV, Surface Image Velocimeter)로 부르고 있다(김서준 등, 2013).

본 연구에서는 SIV 중에서도 스마트폰을 이용한 휴대용 표면유속 측정기술을 개발하고자 한다. 아울러 현재까지 진척된 개발 상황을 구체적으로 기술한다.

4.1. 표면영상유속계 측정법

가. 입자영상유속계 측정법

SIV는 Ettema et al.(1997)이 LSPIV라고 이름붙였듯이, PIV에서 기반하였다. 따라서, SIV를 이해하기 위해서는 PIV의 기본 개념을 이해해야 한다. PIV는 유동장 정보를 눈으로 볼 수 있게 하는 유동 가시화 (flow visualization) 기술과 깊은 관련을 가지고 있다. 유동 가시화는 유체의 수송 현상 (transport phenomena)을 눈에 보일 수 있도록 하는 것으로, 유체 안에 적절한 입자나 염료기포 등을 투입하여 속도, 압력, 밀도 및 온도와 같이 우리 눈에 직접 보이지 않는 유동 정보의 공간 분포를 어떤 범위의 시간과 공간에서 눈에 보이도록 하는 실험 방법이다. PIV는 이렇게 가시화된 유동장을 영상 또는 화상 (사진이나 비디오 등)으로 만들어 속도 분포를 측정하는 방법이다.

PIV는 이용하는 레이저광의 조사 방법, 카메라의 구성에 따라 매우 다양한 조합이 가능하다. 현재, 연구중 또는 실용화되어 있는 PIV는 SPIV (Stereo PIV), 3차원 PIV, 고속 PIV, Micro PIV 등이다. 이들 중에서 현재 가장 보편적인 것은 2차원 PIV이다 (Raffel et al., 2007).

나. 표면영상유속계 측정법

SIV는 PIV의 개념을 하천 표면유속 측정에 응용한 것이다. 즉, 하천 표면에 있는 부유물, 기포, 탁도에 의한 색상 등을 추적자로 활용하여 하천의 표면유속을 측정한다. PIV가 레이저 광원을 이용하여 실험실에서 유속을 측정하는 장비인데 반하여 SIV는 일광을 이용하여 하천의 표면 유속을 측정하는 장비이다. SIV는 PIV의 개념을 이용하고 있지만 여러 가지 면에서 PIV와 그 궤를 달리한다. 레이저와 같은 인위적인 광원을 필요로 하기 때문에 주로 실내실험에서 이용되는 PIV와는 달리, SIV는 주로 넓은 영역을 대상으로 하기 때문에 영상획득 및 영상처리 과정은 대상지역의 규모 및 촬영 방법에 따라 차이가 있다. SIV 기법의 기본원리 및 적용방법을 이해하기 위해서는 이러한 두 기법간의 적용상 차이점을 파악하는 것이 필요하다. 두 기법간 적용상의 차이점은 광원의 종류, 분석대상 영역의 규모, 영상의 왜곡 발생 여부, 측정되는 흐름장의 종류 및 추적 입자의 투여여부 등을 들 수 있다.

다. 표면영상유속계 측정법의 역사

표면영상유속계 측정법의 시초는 Kinoshita(1984)가 두 매의 항공사진에서 카메론 효과 (Cameron effect)를 이용하여 홍수시 하천 표면의 유속 분포를 계측한 것으로 볼 수 있다. 그 뒤 Aya et al.(1995)이 캠코더 영상을 이용하여 하천 표면을 촬영하고, 이 촬영된 영상을 분석하여 유속을 계측하는 방법을 제안하였다. 이 때 처음으로 참조점의 사영변환에 의한 영상 왜곡 보정 기술을 도입하였다. 그 뒤 1997년에 후지타가 아이오

와 대학에 방문 연구원으로 있는 동안에 대형 수리모형실험에 이 기법을 적용하고 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimery)라는 명칭을 도입하였다(Ettema et al., 1997). 그 뒤 후지타는 이 표면영상유속측정법을 CCTV에 적용하려 시도하였다(Fujita et al., 2002), 우리나라 연구자들이 영상유속측정 개념을 도입한 것도 이 시기이다. 우리나라에서는 명지대학교와 동의대학교를 중심으로 연구가 진행되었다. 노영신(2005)과 김남길(2010), 김서준(2013)의 논문이 대표적이다. 한편, 표면영상유속계의 가장 큰 문제는 야간에는 특별한 조명을 하지 않는 한 하천 표면을 촬영하기 어렵다는 점이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 적외선과 원적외선(Fujita et al. 2013; Yu and Yoon, 2015)을 이용하는 방안이 연구되고 있다. 이러한 연구중 주요한 것을 요약하면 <표 3-9-43>과 같다.

<표 3-9-43> 표면영상유속계 주요 역사

연도	연구자	내용
1984	일본의 Kinoshita	항공사진을 이용한 홍수 흐름 해석. 카메론 효과 이용.
1995	일본의 Aya와 Fujita	캠코더 영상 이용. 참조점의 사영변환에 의한 영상 왜곡 보정 기술 도입
1997	Ettema 등	LSPIV 명칭 도입. 대형 수리 실험에 표면영상 유속계 적용
2001	Ishikawa 등	ITV 시설의 카메라를 이용한 고정식 표면영상유속계 시도
2002	Fujita 등	optical flow 법에 의한 표면영상유속계
2005	노영신	국내 표면영상유속계 연구 시작. 실험실과 하천 적용
2010	김서준 등	고정식 표면영상유속계 적용 사례
2010	Dramais 등	프랑스 등 유럽의 LSPIV 연구 다수 등장

한편, 2014년부터는 한일 양국의 연구자들이 거의 동시에 스마트폰을 이용한 영상유속계 개발에 나섰다. 일본에서는 Tsunbaki et al.(2015)이 아이폰을 이용하고 있으며, 우리나라에서는 Yu and Cho(2014)가 안드로이드폰을 이용하고 있다.

그러나 SIV는 2015년 현재도 개발 중인 기술이며, 실용화를 위해서는 몇 가지 해결해야 할 과제를 안고 있다. 따라서 우리나라에서는 아직 시판중인 장비나 프로그램이 없으며, 일본의 경우는 2014년부터 이를 이용한 영상해석 소프트웨어 ‘KU-STIV’를 발매하였다(Motonaga et al., 2015).

4.2. 표면영상유속계의 기본 구성

가. 영상획득 장치

SIV의 영상 획득 장치는 일반적으로 상용 비디오 카메라나 디지털 카메라를 이용한다. 우리나라에서 판매되는 일반 비디오 카메라는 NTSC 방식이며, 초당 30 프레임의 영상을 만들어 낸다. 각 프레임은 640×480 화소로 되어 있다. 최근의 비디오 카메라는 full-HD이므로 이보다 훨씬 높은 해상도의 영상을 제공한다.

최근에는 스마트폰을 이용하는 연구가 진행되고 있으며, 적외선 카메라나 원적외선 카메라(열영상 카메라)를 이용한 연구도 진행되고 있다. 본 연구에서는 스마트폰을 이

용한 표면영상유속계를 구성한다.

나. 영상 분석

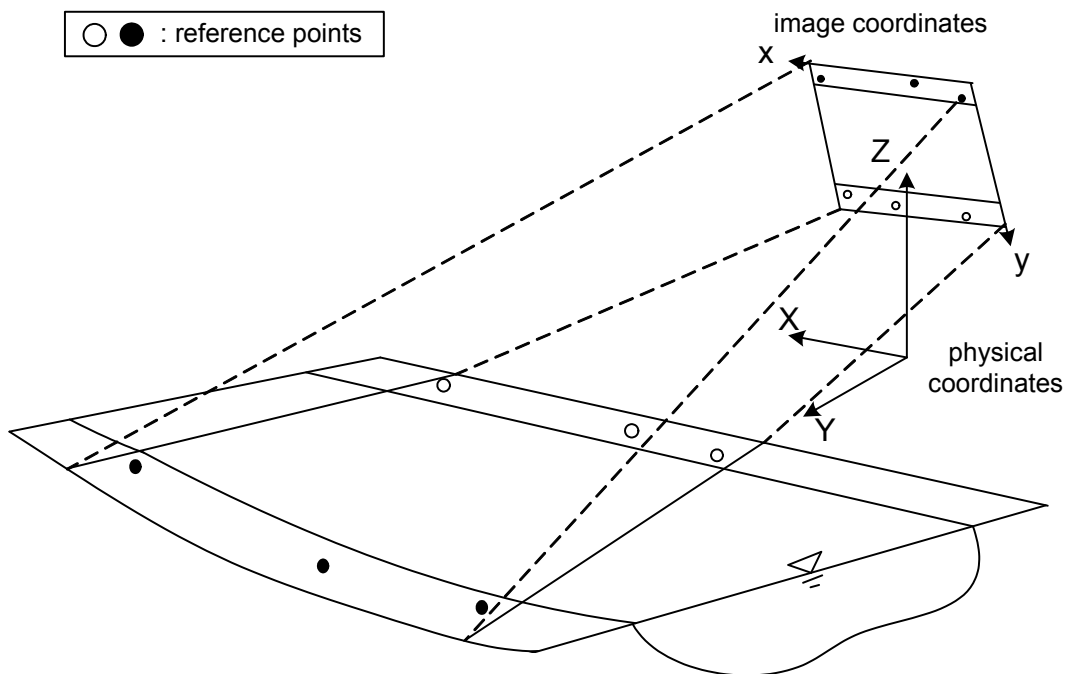
(1) 영상의 좌표 변환

SIV는 영상 획득 시 비스듬한 각도로 수표면의 영상을 기록하므로 이에 대한 왜곡은 카메라의 촬영 각도에 의한 원근상의 왜곡이다. 하천과 같은 넓은 영역의 유속을 측정하는 경우, 실제좌표계(physical coordinate)와 영상좌표계(image coordinate)간의 관계를 이용하여 영상에 대한 왜곡을 수정해주어야 한다. 2차원 투영좌표 변환법에 의한 실제 좌표계 (X, Y) 와 영상 좌표계 (x, y) 간의 관계식은 다음 식 (3-9-1a)과 식 (3-9-1b)와 같다.

$$x = \frac{c_1 X + c_2 Y + c_3}{c_7 X + c_8 Y + 1} \quad \text{식 (3-9-1a)}$$

$$y = \frac{c_4 X + c_5 Y + c_6}{c_7 X + c_8 Y + 1} \quad \text{식 (3-9-1b)}$$

여기서 $c_i (i=1,2,\dots,8)$ 는 두 좌표계간의 좌표보정을 위한 8개의 사상 계수이다. 식 (3-9-1a)와 식 (3-9-1b)는 기준점 각각에 대해 성립하며 8개의 미지수를 갖기 때문에 최소 4개의 기준점을 필요로 한다.



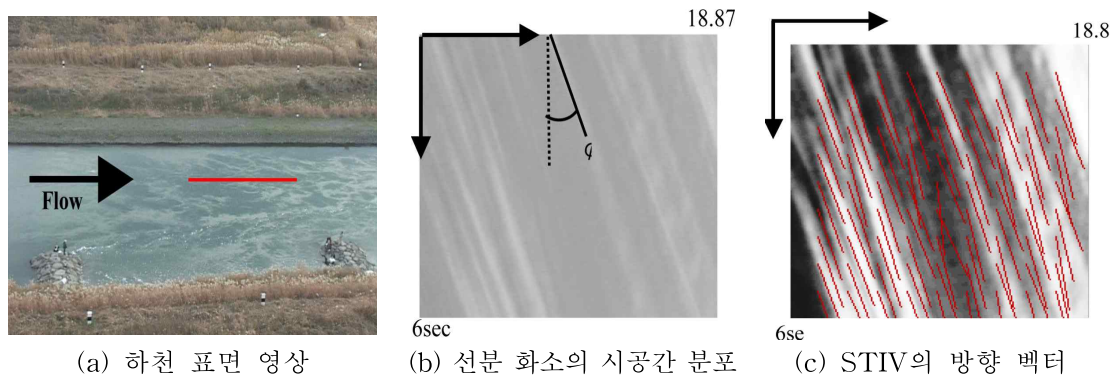
(그림 3-9-72) 영상 변환의 기준점 (Fujita et al., 1998)

(2) 상호 상관 분석

상호상관 분석(cross correlation analysis)은 획득된 첫 번째 영상을 여러 개의 작은 영상 조각으로 나누어서 이 영상 조각과 가장 비슷한 영상 조각을 둘째 영상에서 찾아내는 것이다. 이 비슷한 영상을 찾을 때 대부분의 PIV 소프트웨어는 다음과 같은 이산 상호 상관 계수 (discrete cross-correlation coefficient)를 이용한다. 상호상관법은 선형 이동을 전제 조건으로 하며, 미소 탐색영역(search area)의 크기가 커질수록 계산하여야 하는 곱셈의 수가 증가한다.

(3) 시공간 영상 분석법

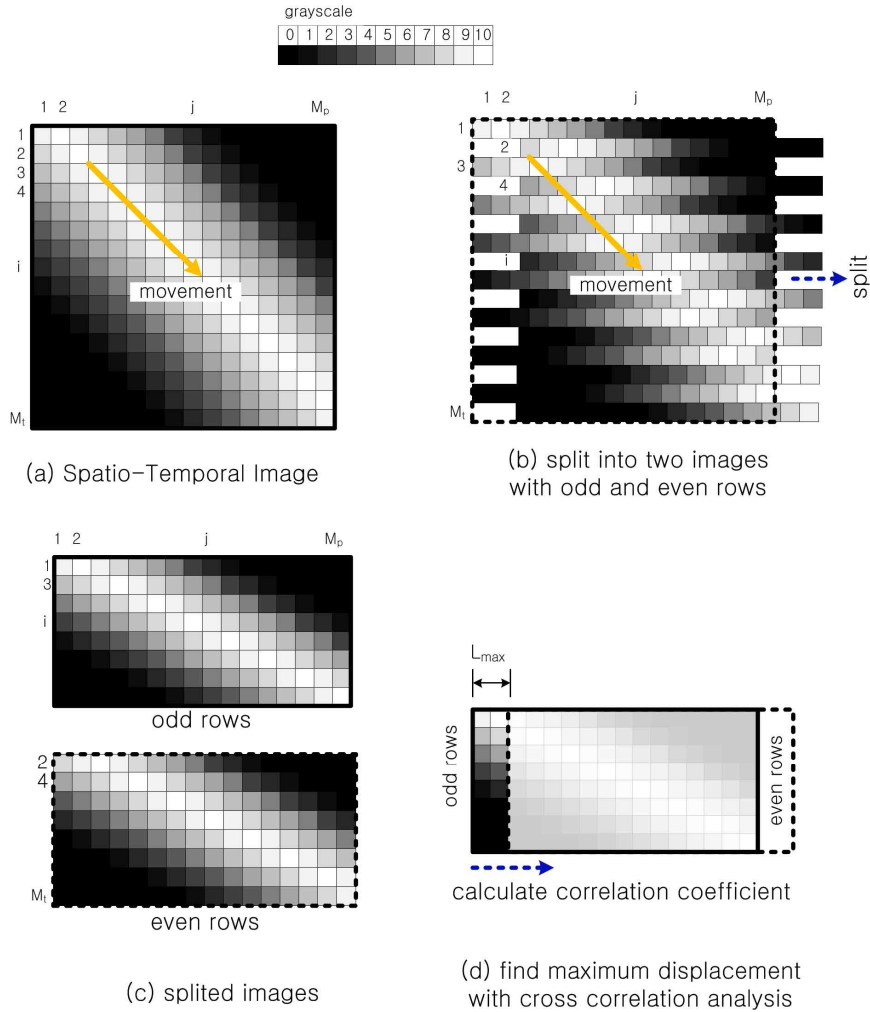
하천 표면에는 수표면의 색상이나 밝기, 거품 등의 패턴이 큰 형태를 이루고 있으며, 이 형태는 하류 방향으로 이동한다. (그림 3-9-73(a))에 보인 바와 같이 하류 방향으로 직선을 긋고 연속 촬영된 영상에서 이 직선상의 화소들을 모아서 영상을 재구성하면 (그림 3-9-73(b))와 같이 밝은 여러 개의 경사선들을 볼 수 있을 것이다. 이 때 직선을 길이는 18.87 m 이고, 전체 영상의 수는 180개(6초)이다. 이 (그림 3-9-73(b))를 시공간 영상(spatio-temporal image)라 부르며, 여기서 가로축은 흐름 방향이고, 세로 축은 시간이다. 이 그림의 흰 꺾적들은 (그림 3-9-73(a))의 선분 위의 영상들이 시간에 따라 이동된 것을 보여 준다. 즉, 이것은 영상의 각 점의 공간적-시간적 변화를 이용한 것이다. 이 시공간영상에서 흰 꺾적들의 기울기를 구하면 바로 유속 벡터 (그림 3-9-73(c))가 된다.



(그림 3-9-73) 시공간영상분석법(Fujita et al., 2005)

이 방법은 상호상관분석법보다 매우 빠르기 때문에 실제 하천에 적용할 때 매우 유용하지만, 흐름 방향을 미리 알아야 하며, 이 흐름 방향의 유속만 구할 수 있다.

Yu et al. (2014)은 이 방법을 개량하여, 2차원 유속장을 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 즉 시공간 영상을 홀수열과 짝수열로 이분하고, 이에 대해 상호상관법을 적용하는 방법을 제안하고, 이를 CASTI(Cross-correlation Analysis for Spatio-Temporal Image)라 불렀다. 이 CASTI는 Fujita et al.(2005) 등의 방법과 달리 2차원 유속 분포장을 직접 측정할 수 있으므로, 사전에 주흐름 방향을 명시한다거나 하는 문제가 없다. CASTI의 기본 개념은 (그림 3-9-74)와 같다.



(그림 3-9-74) CASTI의 개념도(김서준 등, 2013)

다. 스마트폰 OS와 하드웨어, 소프트웨어

(1) 안드로이드 스마트폰

앞서 언급한 것처럼, 기존의 대부분의 표면영상유속계는 ① 캠코더 영상녹화, ② PC로 동영상 내려 받기와 영상 분석의 2단계 처리에 의존하고 있다. 즉, 진정한 의미의 실시간 표면영상유속계는 아직 없다. 일본에서 2002년 무렵부터 CCTV를 이용하려는 시도가 있었으나, 여전히 CCTV의 녹화된 영상과 PC의 분석 2단계로 이루어지고 있다.

이런 면에서 2007년부터 개발된 아이폰이나 안드로이드폰 등 스마트폰은 표면영상유속계 장비로 적절히 활용할 수 있다. 즉, 스마트폰에 내장되어 있는 카메라를 이용하여 촬영을 하고, 또한 안에 내장된 CPU에서 영상 분석을 하면, 현장에서 실시간으로 직접 유속을 분석할 수 있다.

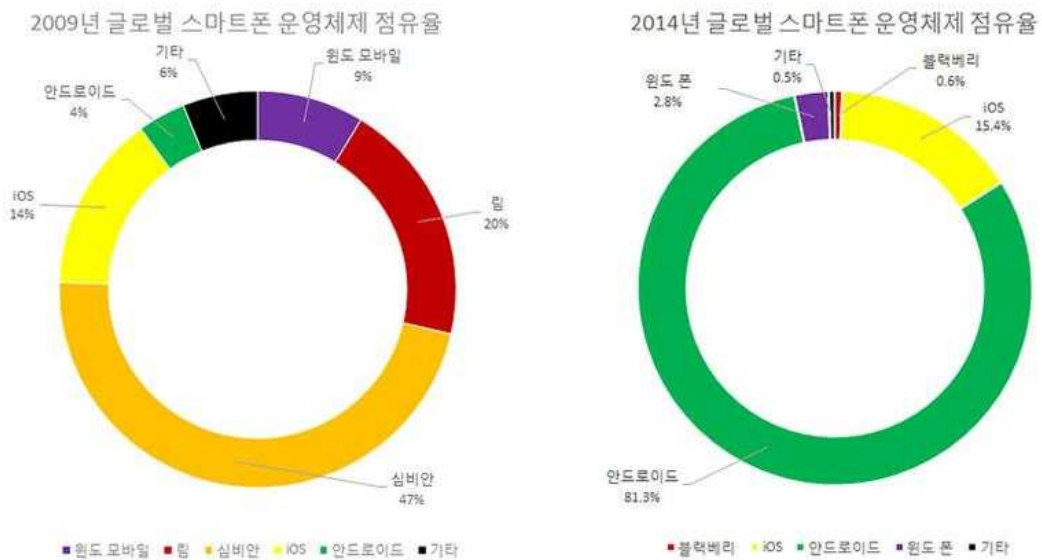
이런 방법은 또 다른 장점을 지니고 있다. 즉, 기존의 표면영상유속계는 모두 영상변환을 위해 참조점을 필요로 하고 있다. 참조점을 이용할 경우 발생하는 문제는, 영상의 취득을 위해 사전에 참조점을 설정하고, 평면 측량을 해 두어야 하는 번거로움이 있으며, 참조점을 설정하기 어려운 대하천의 경우 표면영상유속계를 적용하기 곤란하다. 그런데, 스마트폰을 이용하면 그 안에 내장된 경사계로 측정된 3개의 경사각(방위각, 전

후각, 좌우각)과 수면과의 높이차를 이용하여 참조점 없이도 영상 변환이 가능하다.

아울러, 다른 장비와 달리 스마트폰은 통신 기능이 있으므로, 프로그램의 수정이나 갱신 등을 할 때 간단하게 수정된 프로그램을 통신으로 보내서 이용자들이 언제든지 편리하게 프로그램을 갱신할 수 있다.

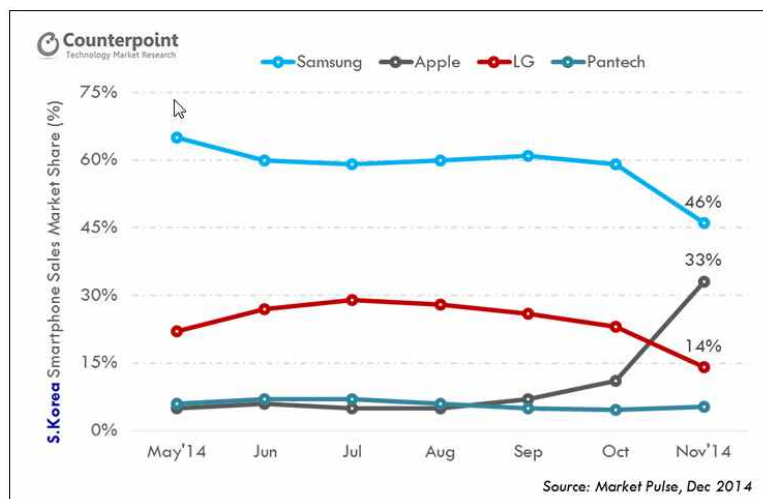
(2) 국내외 스마트폰의 개발 상황과 기술 수준 분석

2015년 현재 전세계 스마트폰은 크게 아이폰과 안드로이드폰으로 이루어져 있다. 이를 OS별로 시장 점유율을 살펴보면 (그림 3-9-75)와 같다. 즉 2014년 현재 안드로이드 기반의 스마트폰이 시장의 81.3%를 점유하고 있다.



(그림 3-9-75) OS별 스마트폰 시장 점유율 변화

이를 국내로 돌려 보면, 안드로이드폰이 시장의 2/3를 차지하고 있다(그림 3-9-76). 이런 면에서 국내에서 스마트폰을 이용한 표면영상유속계를 제작할 때는 안드로이드 기반으로 하는 것이 유리하다고 판단하였다.



(그림 3-9-76) 제조사별 국내 스마트폰 점유율

(3) 휴대용 표면영상유속계의 성능 설정

스마트폰을 이용한 휴대용 표면영상유속계를 개발하기 위해 먼저 필요한 목표 성능을 설정하였다.

- 계측 속도 범위: 표면영상유속계의 계측 범위는 추적자의 유무에 따라 달라진다. 본 연구에서 대상으로 하는 농수로는 일반적으로 추적자의 산포가 용이하므로, 추적자가 있는 경우를 대상으로 한다. 이 때 측정할 수 있는 최소 유속은 0.05 m/s 내외로 볼 수 있다. 반면, 최대 유속은 이론적으로 제한이 없으나 실용적인 면에서 약 10.0 m/s 정도까지도 계측할 수 있다.
- 속도 분해능: 0.01 m/s
- 측정 빈도: 10초당 1회 측정
- 정확도: $\pm 5\%$
- 통신: 유무선 통신 지원
- 소프트웨어: 스마트폰 앱, PC 또는 태블릿 PC 프로그램
- 하드웨어: 스마트폰, 노트북 PC 또는 태블릿 PC
- 부속품: 거치대, 조명
- 기타: 예약 측정 기능, 영상유속계끼리 연계 기능

(4) 휴대용 표면영상계 시스템의 필요 사양 설정

본 연구에서 대상으로 하는 안드로이드 기반 스마트폰의 하드웨어는 다음과 같아야 한다.

- 대상으로 하는 스마트폰의 하드웨어는 현재 국내에서 가장 일반적으로 이용되는 Galaxy S4 급(32nm 공정 엑시노스 1.4GHz 쿼드코어 프로세서) 이상으로 한다.
- 스마트폰 카메라: 현재 일반적인 스마트폰 카메라는 영상 분석에 충분한 해상도(기본으로 640×480 화소)를 지니고 있다.
- 스마트폰 경사계: 통상 스마트폰의 경사계는 $\pm 0.1^\circ$ 내외의 오차를 지니고 있으나, 본 연구 분석에서는 그보다 낮은 정확도($\pm 1^\circ$ 내외)로도 충분함. 방위각의 경우 주변에 자성 물질(철제 구조물)이 있을 경우, 오차를 발생할 수 있으므로, 이에 대한 분석이 있어야 한다.
- 분석을 위한 CPU는 현재 필요한 영상 정보를 수 초 이내에 완료할 수 있을 정도이며, 현재의 Galaxy S4 급(32nm 공정 엑시노스 1.4GHz 쿼드코어 프로세서)으로 충분한 분석 능력이 될 것으로 기대한다. 또한, 기반이 되는 안드로이드는 다음과 같은 특징을 갖는다.
- 스마트폰 OS: 2015년 6월 현재 가장 최신인 4.4.2인 KitKat을 대상으로 한다. 통상적으로 스마트폰 OS의 경우, 하위버전과 호환이 되도록 기술개발이 이루

어지므로 현실적으로는 문제가 되지 않지만, 호환이 안 될 경우를 고려하여, 개발의 최종 단계에서 OS에 맞춰 앱을 수정 개발(버전업)할 예정이다.

또한, 스마트폰용 앱의 개발 환경은 PC에 Eclipse 4.4 (Luna)를 설치하고 개발할 계획이다.

라. 표면영상유속계 시스템

(1) 기본 구조

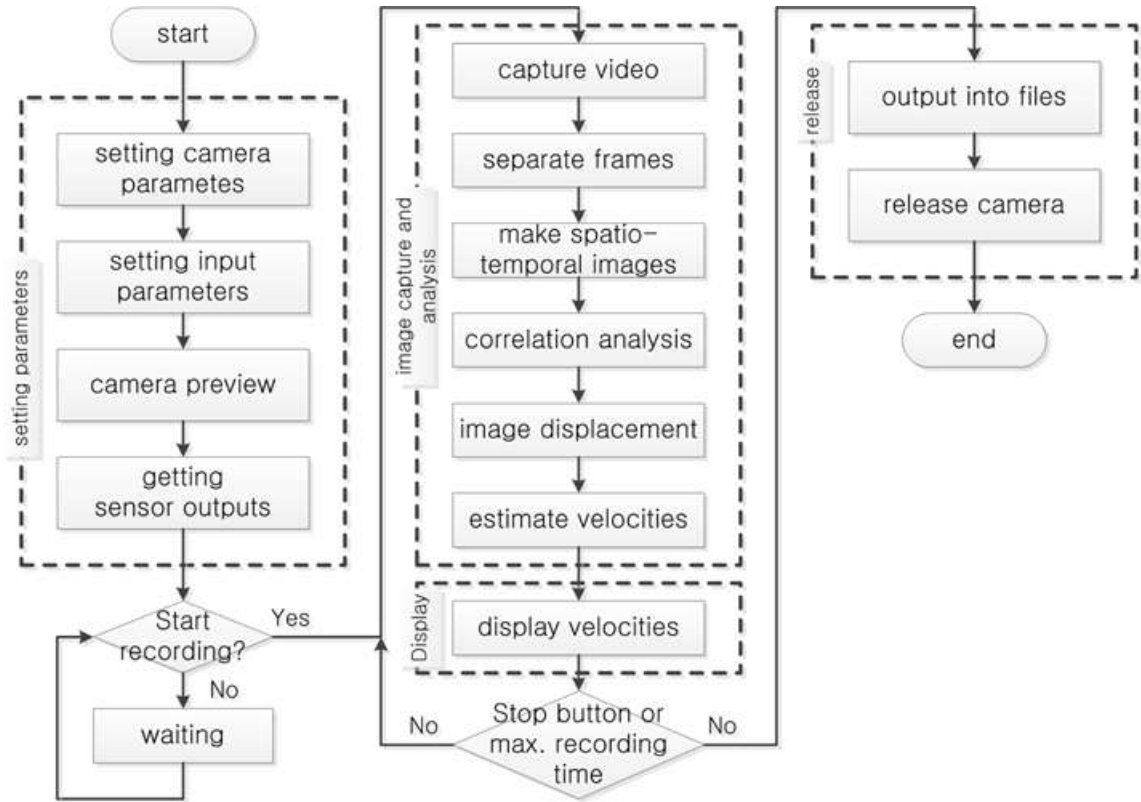
안드로이드 스마트폰을 이용한 표면영상유속계의 기본 구조는 (그림 3-9-77)과 같다. 전체 구조는 ① 영상 취득, ② 프레임 분해, ③ 영상 분석, ④ 결과 도시의 네 단계로 이루어져 있다. 즉, 영상 취득은 스마트폰 자체에 내장된 카메라를 이용하여 2~5초 정도의 동영상을 촬영한다. 이 때, 카메라 렌즈와 수표면과의 높이는 이용자가 미리 설정해 두어야 한다. 이렇게 설정된 카메라 높이와 카메라의 진후각을 이용하여 수표면의 축척을 미리 계산해 둘 수 있다.

저장된 동영상을 다시 불러들여서, 개방 함수 라이브러리인 JavaCV를 이용하여 촬영된 동영상을 프레임 단위로 분할한다. 분할된 각 프레임에서 영상을 몇 줄 잘라내어 시간에 따라 차곡차곡 쌓아서 시공간 영상을 작성한다.

또한 이 과정을 흐름도로 나타내면, (그림 3-9-78)과 같다.



(그림 3-9-77) 스마트폰 영상유속계에 의한 유속 산정 개요도



(그림 3-9-78) 표면영상유속계의 분석 흐름도

(2) 영상 취득

영상 취득은 스마트폰에 장착된 카메라를 이용한다. 이 때, 프리뷰 기능 장착하여 실제 측정할 부분을 화면에 정확히 표시하도록 한다.

또, 이 때 경사계로 촬영 영상의 방위각, 전후각, 좌우각을 기록한다. 이 중 전후각은 카메라와 수표면 상의 거리를 계산하여, 추후 영상 분석의 축척 변환에 이용한다.

동영상을 녹화하는 해상도는 여러 가지가 있으나, 이들 중에서 640×480 화소 또는 720×480 화소의 30 FPS의 NTSC 표준영상으로 녹화한다. (그림 3-9-79)는 촬영 화면의 기본 구조를 보인 것이다.

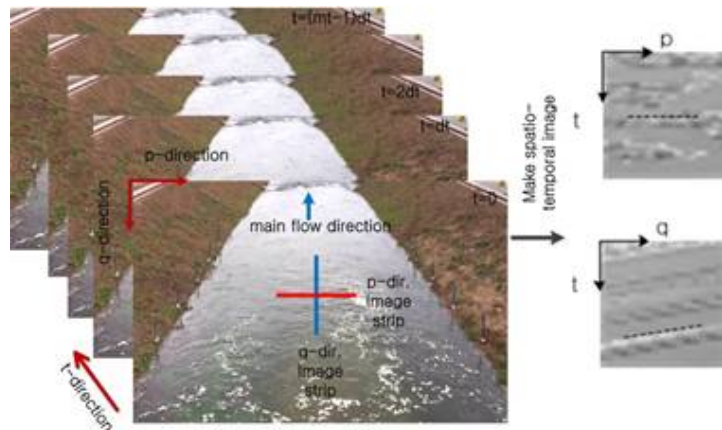


(그림 3-9-79) 촬영 화면의 구조

(3) 영상 분석

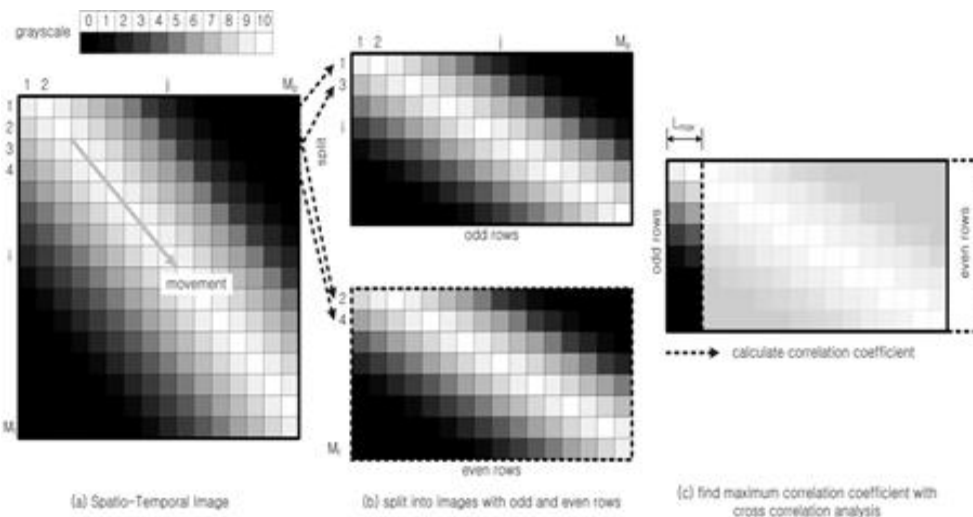
이렇게 작성된 시공간 영상에서 줄무늬의 기울기를 분석해 내면, 이것이 바로 유속에 해당한다. 즉 녹화된 영상을 시공간 영상 분석법(Spatio-Temporal Image Analysis)의 일종인 CASTI(Correlation Analysis of Spatio-Temporal Image)로 영상 내 변위 분석한다. CASTI는 연구 책임자가 특허 등록한 시공간 영상 변위 분석 기법이다.

먼저, 개방 함수 라이브러리인 JavaCV를 이용하여 촬영된 동영상을 (그림 3-9-81)과 같이 프레임 단위로 분할한다. 분할된 프레임에서 영상 몇 줄을 잘라내어 시간에 따라 차례로 쌓으면, (그림 3-9-80)의 오른쪽과 같은 시공간 영상((Spatio-Temporal Image)이 만들어진다. (그림 3-9-80)의 오른쪽에 있는 두 개의 시공간 영상은 각각 가로 방향과 세로 방향의 것이다.



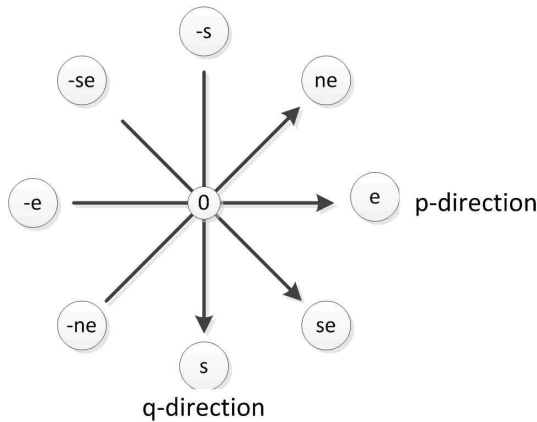
(그림 3-9-80) 동영상의 프레임 분리와 시공간영상 만들기

(그림 3-9-80)에 보인 시공간 영상에서 줄무늬의 기울기를 찾아내는 방법이 바로 CASTI이다. CASTI는 시공간 영상을 짝수행과 홀수행으로 나누어 두 개의 영상으로 분리한 뒤 이 둘 사이의 상호상관 분석에 의해 최대 상관값이 나오는 영상 변위를 찾아내는 방법이다. 이를 개략적으로 보이면 (그림 3-9-81)과 같다.

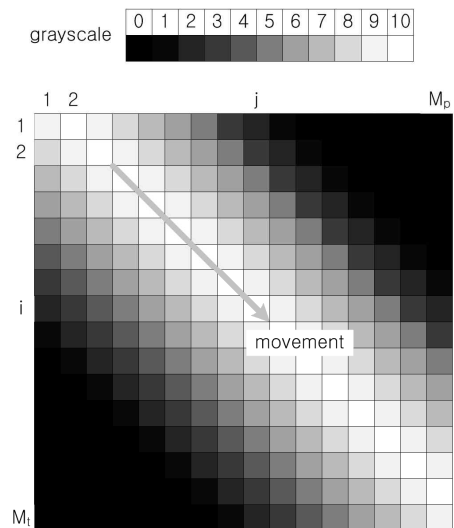


(그림 3-9-81) CASTI의 원리

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법에서 최대 상관 계수와 변위를 산정하는 과정을 $t-p$ 시공간 영상을 예로 들어 살펴보면 다음과 같다. M_t 개의 영상위의 점 (p, q) 에서 그림 3.9.83과 같이 팔방향으로 각각 M_p 개의 행방향 영상을 잘라내어 네 개의 시공간 영상을 구성한다. 즉, 유속 분석을 (p, q) 를 중심으로 팔방으로 분석할 수 있도록 한 것이다. 이와 같이 잘라낸 영상의 길이는 유속 자료를 공간 평균하는 역할을 한다. 따라서 유속 측정 환경을 고려하여 잘라내는 영상의 행방향 길이를 결정하여야 한다. 하지만 일반적으로 하천의 유량 조사에서는 흐름방향의 공간 평균이 유량 정확도에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 문제는 없다. 시공간 영상 중 e -방향(방향 p)의 영상을 개념적으로 보이면 (그림 3-9-82(a))와 같다. 이 시공간 영상의 크기는 $M_t \times M_p$ 이다. 이 (그림 3-9-82(b))에서 흰색 줄무늬가 영상내에 있는 각종 추적자의 움직임을 나타낸다.



(그림 3-9-82(a)) 측정선의 방향



(그림 3-9-82(b)) 시공간영상의 개념

이 시공간 영상을 앞의 (그림 3-9-81)과 같이 짝수행과 홀수행으로 두 개로 나눈 뒤 상호상관법으로 분석하는 것이 CASTI의 기본 원리이다.

이것은 시공간 영상의 자기상관(auto-correlation)의 성격을 갖는다. 또한, 이 과정은 시공간 영상의 i 번째 행과 $i+1$ 번째 행의 쌍, 즉 M_t-1 개의 쌍에 대해 각 변위별 상관계수를 평균한 것과 같은 의미를 갖는다. 이와 같은 방법으로 상관 계수의 시간 평균을 한꺼번에 구할 수 있다. 다음으로 여러 영상변위 L 에 대한 상관계수 중에서 가장 큰 값인 최대 상관계수($R_{L_{\max}}$)를 갖는 변위(L_{\max})를 구한 후 다음의 식 (3-9-2)를 이용하여 줄무늬의 기울기를 계산한다.

$$\tan\phi = \frac{L_{\max}}{\Delta t} \quad \text{식 (3-9-2)}$$

이와 같이 계산한 줄무늬의 기울기($\tan\phi$)를 그대로 적용하면, 이산화된 유속을 얻게

된다. 따라서 PIV 기법에서 이용하는 부화소법(sub-pixel method)을 이용하여 보간하는 작업이 필요하다(Raffel et al., 2007). 다음 식 (3-9-3)과 같이 이차첨두형 보간법을 이용하면 최종적으로 오른쪽 방향 변위(L_e)를 구할 수 있다.

$$L_e = L_{\max} + \frac{R_{L_{\max}-1} - R_{L_{\max}+1}}{2R_{L_{\max}-1} - 4R_{L_{\max}} + 2R_{L_{\max}+1}} \quad \text{식 (3-9-3)}$$

만일 이 때, $R_{L_{\max}}$ 가 어떤 정해진 값(대체로 0.7 정도)보다 작은 경우는 L_e 를 0으로 보도록 한다. 마찬가지로 영상의 다른 세 방향(s -방향, se -방향, ne -방향)에 대해서도 시공간 영상 분석을 하여 각 방향 영상 변위를 구할 수 있다. 그리고 네 가지 방향의 영상 변위 중에서 가장 상관계수가 높은 것을 채택하면 그 방향이 주흐름 방향이 되고, 그에 직각 방향을 선택하면 2차원 유속 분포를 결정할 수 있다. 이 때, e -방향 또는 s -방향이 주 흐름 방향일 경우에는 e -방향의 영상 변위에서 p 방향 변위가 결정되고, s -방향의 영상 변위에서 q 방향 변위가 결정되지만, ne -방향 또는 se -방향이 주 흐름 방향일 경우에는 다음 식 (3-9-4a) 식 (3-9-4b)와 같이 결정한다.

$$p \text{ 방향 변위} = \frac{1}{\sqrt{2}}(se\text{-방향 변위}) + \frac{1}{\sqrt{2}}(ne\text{-방향 변위}) \quad \text{식 (3-9-4a)}$$

$$q \text{ 방향 변위} = \frac{1}{\sqrt{2}}(se\text{-방향 변위}) - \frac{1}{\sqrt{2}}(ne\text{-방향 변위}) \quad \text{식 (3-9-4b)}$$

(4) 좌표 변환

여태까지 분석한 변위는 어디까지나 화소 단위의 영상 변위이기 때문에 실제 유속을 계산하기 위해서는 화소단위를 실제 거리단위로 환산해주어야 한다. 즉, 영상 좌표 (p, q) 는 전체 분석 시간 t 동안 $(p+L_p, q+L_q)$ 로 이동할 것이다. 따라서 영상 좌표 (p, q) 와 $(p+L_p, q+L_q)$ 를 실제 좌표 (x, y) 와 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ 로 변환하여야 한다. 이 때 왜곡된 영상을 보정하기 위하여 8점 변환이나 11점 변환 등의 좌표 변환 과정이 필요하다. 8점 변환은 노영신(2005)에 자세히 소개되어 있으며, 11점 변환은 김서준 등(2011)에 제시되어 있다. 8점 좌표 변환을 간단히 소개하면 실제 좌표 (X, Y) 는 다음 식 (3-9-5a) 식 (3-9-5b)와 같은 관계에 의해 영상 좌표 (p, q) 로 나타낼 수 있다(노영신, 2005).

$$p = \frac{c_0 X + c_1 Y + c_2}{c_6 X + c_7 Y + 1} \quad \text{식 (3-9-5a)}$$

$$q = \frac{c_3 X + c_4 Y + c_5}{c_6 X + c_7 Y + 1} \quad \text{식 (3-9-5b)}$$

여기서, c_0, \dots, c_7 은 좌표 역변환 계수이다.

단, 식 (3-9-5a)와 식 (3-9-5b)는 기준점들의 높이를 고려하지 못하며, 기준점들은 같은 평면에 위치하는 것으로 가정한다. 이 가정은 많은 경우 큰 문제가 없이 적용될 수 있다. 즉, 하천의 표면 유속을 측정할 경우 수면이 수평이라고 한다면 이 가정에는

큰 문제가 없다.

식 (3-9-5a)와 식(3-9-5b)의 역변환을 이용하면, 영상 좌표 (p, q) 에서 물리 좌표 (X, Y) 는 다음과 같이 계산된다.

$$X = \frac{(c_4 - c_5c_7)p + (c_2c_7 - c_1)q + (c_1c_5 - c_2c_4)}{(c_3c_7 - c_4c_6)p + (c_1c_6 - c_0c_7)q + (c_0c_4 - c_1c_3)} \quad \text{식 (3-9-6a)}$$

$$Y = \frac{(c_5c_6 - c_3)p + (c_0 - c_2c_6)q + (c_2c_3 - c_0c_5)}{(c_3c_7 - c_4c_6)p + (c_1c_6 - c_0c_7)q + (c_0c_4 - c_1c_3)} \quad \text{식 (3-9-6b)}$$

이와 같이 변환된 (x, y) 와 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ 를 이용하여 유속 (u, v) 를 다음 식 (3-9-6)과 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad \text{식 (3-9-6)}$$

(5) 결과 표시

이런 과정을 거쳐 분석된 표면유속 측정 결과를 (그림 3-9-84)와 같이 화면에 표시한다. 이들 유속값은 스마트폰 내부에 텍스트 파일로 저장하고 추후에 꺼내어 활용할 수 있게 한다. (그림 3-9-83)에는 5개의 유속 벡터를 표시하였으나, 필요에 따라 이 측정점의 수는 줄이거나 늘일 수 있다.



(그림 3-9-83) 측정 결과의 도시

4.3 표면영상유속계의 보정과 시험

가. 영상 분석

상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 영상 분석 성능을 객관적으로 평가하기 위해 인공 영상(artificial images)을 이용하여 오차 분석을 실시하였다. 인공 영상의 경우 영상의 움직임이 사용자가 원하는 대로 제작할 수 있기 때문에 참값을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 인공영상의 생성방법은 일본의 가시화정보학회(The Visualization Society of Japan, 2002)에서 제시된 PIV 표준 영상 제작법을 재현하였다. 인공영상을

생성하기 위해서는 대상이 되는 속도장을 결정하고, 추적 입자의 위치 정보를 기반으로 영상 내 입자를 생성하는 과정이 필요하다. 이와 같은 인공영상 생성방법을 간단히 소개하면 우선 대상으로 하는 속도장으로서 1차원적인 해석 함수를 이용하거나, Rankine 와류나 Couette 흐름과 같이 수치적으로 모의하기 쉬운 흐름장을 이용하거나, LES 또는 직접 수치 모의에 의한 수치 모의 결과를 속도장으로 이용하도록 한다. 그리고 입자 명암값 형태는 Gauss 분포를 사용하였으며, 입자의 실제 좌표 (x_p, y_p, z_p) 를 화상에 투영한 위치를 (X, Y) 로 놓고, 화상의 명암값 형태 $I(x, y)$ 를 식 (3-9-7)로 구한다.

$$I(x, y) = I_0 \exp\left\{\frac{-(x-x_p)^2 - (y-y_p)^2}{(1/8)d_p^2}\right\} \quad \text{식 (3-9-7)}$$

여기서, d_p 는 영상 내 입자의 크기를 나타낸다. 또한 입자의 밝기를 나타내는 입자의 명암값(I_0)은 레이저 평면광 두께 내부의 분포함수도 가우스함수를 사용한다. 입자 중심에서 최대 강도는 입자가 평면광 두께 내의 위치를 고려하여 식 (3-9-8)로 결정하였다.

$$I_0 = I_{\max} \exp\left\{\frac{-z_p^2}{(1/8)T^2}\right\} \quad \text{식 (3-9-8)}$$

여기서, T 는 레이저 광면의 두께, I_{\max} 는 화상위의 입자의 최대 명암값이다.

마지막으로 입자를 생성하기 위해, 먼저 난수에 의해 추적 입자의 3차원 위치를 결정하고, 추적 입자의 명암값 형태(I)를 구한다. 결정한 흐름특성에 따라 입자 위치를 변화시키면서, 두 번째 시각의 입자 위치를 계산하고, 두 번째 시각의 명암값 패턴을 구한다. 이것을 필요한 입자 개수 만큼 반복적으로 적용하여 연속된 인공영상을 생성한다.

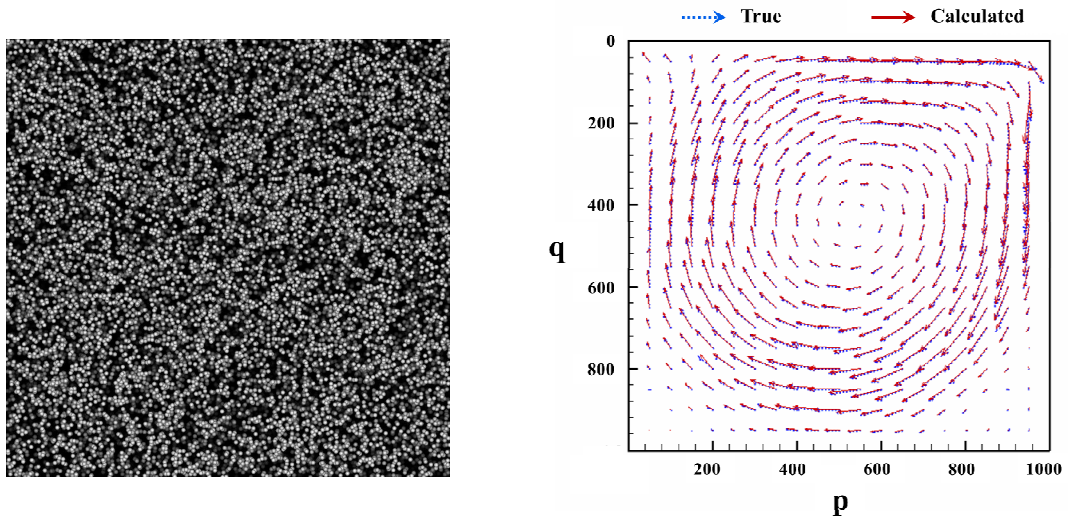
본 연구에서는 인공영상 내 입자의 움직임은 뚜껑 유도 공동 흐름(lid-driven cavity flow)으로 결정하였고, 인공영상의 참값을 확보하기 위해서 공동 흐름에 대한 해석은 Ferziger and Peric (2002)에서 제시한 유한체적법을 이용하였다. 본 연구에서 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 오차 분석에 공동 흐름을 이용한 이유는 공동 흐름이 Ghia et al. (1982)의 연구 이후 많은 연구자들에 의해 흐름 특성이 명확히 밝혀져 있고, 흐름특성으로는 2차원 유속분포를 갖고 있으며, 유속 분포가 균일하지 않고, 최대 유속과 최소 유속의 범위가 크기 때문에 수치 해석 기법의 성능 평가를 위해 많이 이용되고 있으며, 영상 분석 프로그램의 성능 평가에도 가장 적합할 것으로 판단하였다. 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 오차 분석을 위한 인공영상은 <표 3-9-44>와 같은 조건에 대하여 총 60매의 인공영상을 제작하였다.

<표 3-9-44> 인공영상 생성 자료

Number of particles	20,000
Number of images	60
Mean diameter of particles (pixel)	10
Time interval (sec.)	1/60
Width of laser sheet (mm)	2
Image size (pixel)	1,000×1,000

이렇게 제작한 인공 영상 및 분석 결과는 (그림 3-9-84)와 같다. 상호상관법을 이용

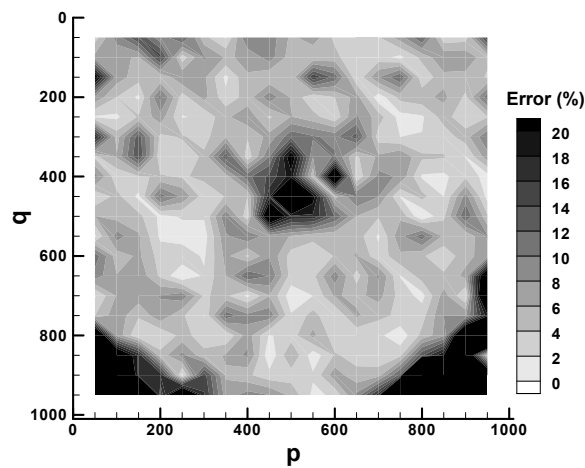
한 시공간 영상 분석법으로 계산한 속도벡터와 공동흐름의 참값을 비교한 결과 (그림 3-9-84(b))과 같이 2차원 유속분포의 흐름방향을 상당히 정확하게 분석하는 것으로 나타났고, 인공영상 전체에 대한 오차를 분석한 결과 회전 흐름이 발생하는 대부분의 측정점에서 최대 10% 이내의 만족스러운 오차를 나타냈다. 비록 5 화소/sec 이하로 속도가 거의 없는 좌우측의 하단부와 중앙부의 오차는 크게 나타났으나, 이는 속도가 너무 작기 때문에 분석 결과가 조금만 차이가 나더라도 상대적으로 오차는 클 수밖에 없기 때문에 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.



(a) 인공영상

(b) 유속분석결과

(그림 3-9-84) 인공영상에 의한 CASTI 영상 분석 시험



(그림 3-9-85) 오차의 분포

대표적인 회전 흐름이 발생하는 지점의 오차 분석 결과를 좀 더 구체적으로 살펴보면 (그림 3-9-85)에 보인 것처럼, 우선(↺)방향의 2차원 흐름을 보이는 영상의 좌측 하단의(200, 800) 지점에서는 p 방향 참값은 -176.6 화소/sec이고, 계산된 속도는 -171.7

화소/sec로 둘 사이의 오차는 약 4.8 화소/sec(약 2.7%)로 나타났고, q 방향 참값은 -154.7 화소/sec이고, 계산된 속도는 -156.3 화소/sec로 둘 사이의 오차는 약 1.6 화소/sec(약 1%)로 나타나 2차원 유속 분포를 매우 정확하게 계산하는 것으로 나타났다. 또한 흐름이 (\rightarrow) 방향에서 (\downarrow) 방향으로 급격히 변하는 우측 상단의(800,300) 지점을 살펴보면 p 방향 참값은 49.0 화소/sec이고, 계산된 속도는 47.8 화소/sec로 둘 사이의 오차는 1.2 화소/sec(약 5.0%)로 나타났고, q 방향 참값은 244.3 화소/sec이고, 계산된 속도는 239.4 화소/sec로 둘 사이의 오차는 5.0 화소/sec(약 2.0%)로 나타났다.

본 연구에서 사용하는 상호상관 시공간영상분석법은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 기존의 PIV 기법의 상호상관법은 유속 측정에 있어서 상관영역의 크기에 따라 유속 측정 정확도에 차이가 나타났으나(김서준, 2013), 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법의 경우 상관영역 크기 결정이 필요 없기 때문에 이에 따른 불확도를 고려하지 않아도 되는 장점이 있었다.

둘째, 기존의 휘도 경사 텐서법은 주흐름 방향만 분석할 수 있었던 것에 반해, 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 상호상관법을 시공간 영상에 8-방향 모두에 적용하여 2차원 유속분포를 측정할 수 있는 것을 확인하였다.

셋째, 시간 평균 유속을 산정하는데 있어 기존의 PIV 기법과 비교하여 분석시간이 크게 단축됨을 확인하였다. 영상 분석시간은 영상의 수와 영상 내 측정 수 및 상관영역의 크기에 따라 결정된다. 동일한 측정 수와 상관영역의 크기가 같다고 가정하였을 때 시간 평균 유속을 얻기 위해서 기존의 PIV 기법은 일정 시간간격을 갖는 두 장의 영상을 이용하여 분석된 순간유속을 분석하고자 하는 시간동안 평균하여 시간 평균 유속을 계산해야 하지만 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 연속된 영상을 연결한 한 장의 시공간 영상을 이용하기 때문에 분석에 필요한 영상의 수가 기존의 PIV 기법과 비교하여 크게 감소시킬 수 있다. 예를 들어 하천의 유량 조사 시 10초 평균된 유속을 얻고자 하였을 때, 기존의 영상유속계는 총 600 장의 영상을 두 장씩 묶어서 총 599회 영상 분석을 실시한 후 그 결과들을 평균하였다면 상호상관법을 이용한 시공간 영상 분석법은 600장의 영상을 시간축으로 놓고 한 번에 계산하기 때문에 동일한 측정 수와 상관영역의 크기가 같다고 가정하였을 때 기존의 PIV 기법의 유속 계산 시간을 약 1/600 정도로 감소되었다. 따라서 향후 실시간 하천 유량조사가 필요한 지점에 크게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 시간 평균한 유속을 계산하기 때문에 시간해상도가 떨어져 난류 분석이 어렵다는 단점이 있다. 이 부분은 기존의 PIV 기법에서 사용하는 상호상관법이나 STIV 기법에서 사용한 휘도 경사 텐서법과 비교하여 단점이라 할 수 있다.

나. 표면 영상 유속계 시험



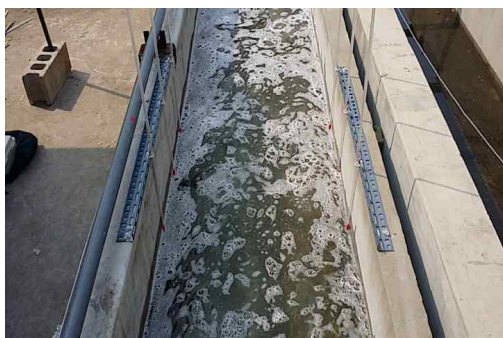
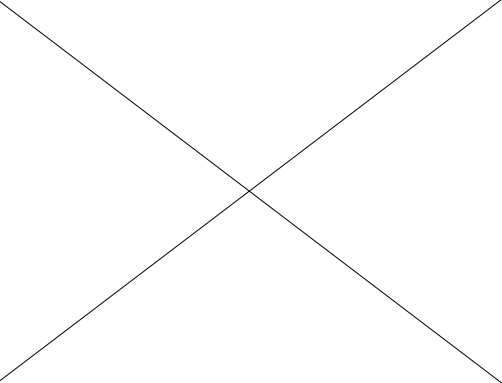
개발된 표면 영상 유속계를 명지대학교 야외실험장의 수로에 대해 적용하였다. 수로는 콘크리트로 제작되었으며, 길이는 10 m, 하폭은 0.8 m, 수심은 0.1~0.3 m까지 조절할 수 있다. 스마트폰은 하류쪽을 바라보도록 설치하였으며, 수면과의 높이는 1.47 m 이고, 각도는 50.5°를 유지하였다. 유속은 저속(평균유속 0.085 m/s), 중속(평균유속 0.471 m/s), 고속(평균유속 0.799 m/s)의 세 가지로 하고, 추적자로는 무입자(추적자를

투입하지 않고 수면파를 분석), 비누거품, 쌀튀밥의 세 종류로 하였다. 실험의 경우를 정리하면 <표 3-9-45>와 같다.




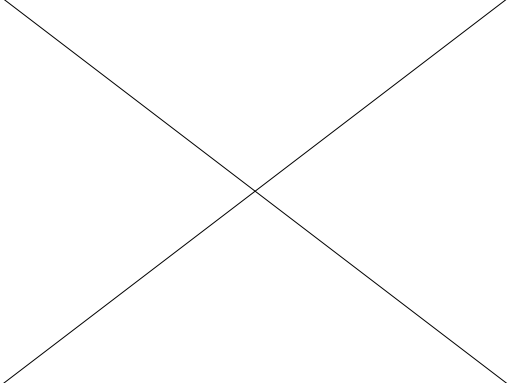



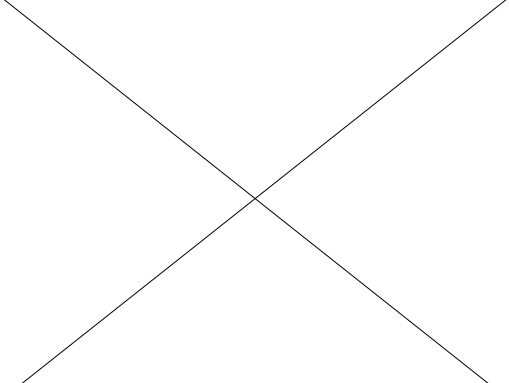
<표 3-9-45> 표면 영상 유속계 시험 개요

케이스	평균유속 (m/s)	추적자
1 (고속-무입자)	0.799	무입자
2 (고속-튀밥)	0.799	쌀튀밥
3 (고속-거품)	0.799	비누거품
4 (중속-무입자)	0.471	무입자
5 (중속-튀밥)	0.471	쌀튀밥
6 (중속-거품)	0.471	비누거품
7 (저속-무입자)	0.085	무입자
8 (저속-튀밥)	0.085	쌀튀밥
9 (저속-거품)	0.085	비누거품

각 경우에 모두 3초의 영상을 720×480 (화소)로 촬영하였으며, 각 실험 경우별 영상의 예를 보이면, (그림 3-9-86)과 같다.

유속	추적자	
고속	 무입자	 쌀튀밥
	 비누거품	

(그림 3-9-86) 실험경우별 영상

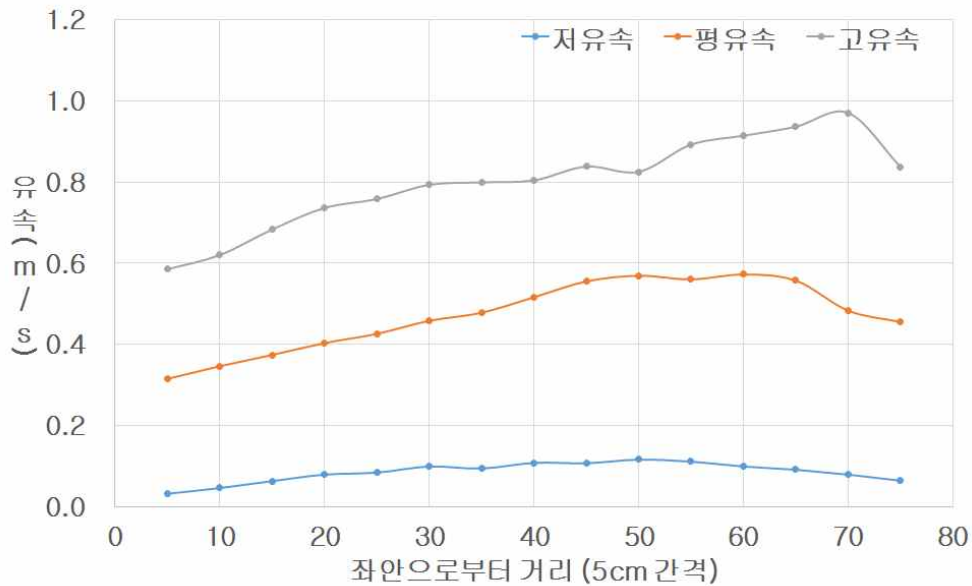
유속	추적자	
	 <p data-bbox="571 616 662 645">무입자</p>	 <p data-bbox="1098 616 1189 645">쌀튀밥</p>
중속	 <p data-bbox="571 996 662 1025">비누거품</p>	
	 <p data-bbox="571 1400 662 1429">무입자</p>	 <p data-bbox="1098 1400 1189 1429">쌀튀밥</p>
저속	 <p data-bbox="571 1814 662 1843">비누거품</p>	

(그림 3-9-86) 실험경우별 영상 (계속)

(그림 3-9-86)에 보인 각 영상에서, 입자를 투여하지 않은 경우에 대해 살펴보면, 유속이 느린 경우는 수표면의 움직임이 거의 볼 수 없었다. 다시 말하자면, 고속이나 중속인 경우 수면파가 생성되기 때문에 수면의 움직임을 육안으로도 파악할 수 있으나, 저속인 경우는 움직임을 거의 알 수 없었다. 이것은 실제 유속 측정시에도 좋지 않은 분석 결과를 보인다. 따라서 저속에서 본 표면영상유속계를 이용할 경우, 적절한 추적자를 투입해야 한다는 것을 의미한다.

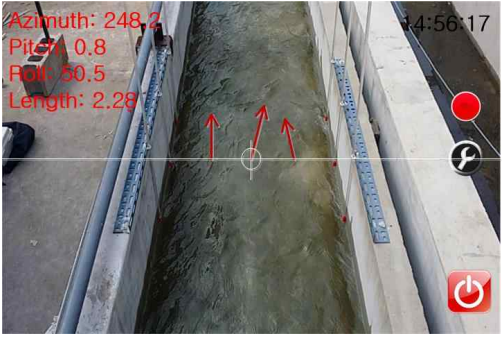


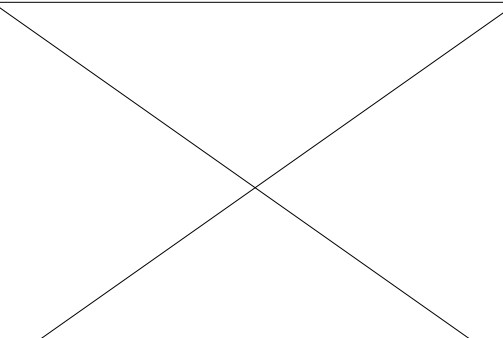
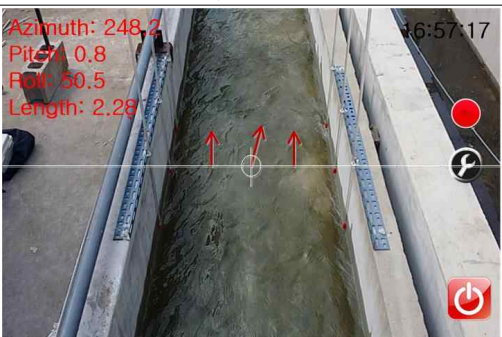


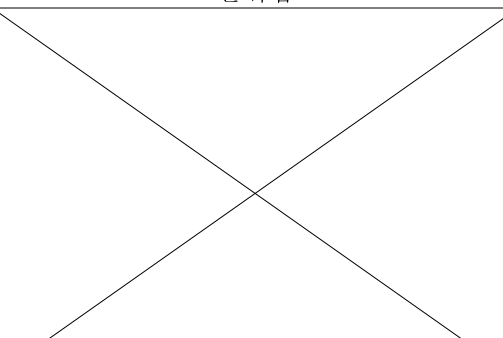
영상의 분석은 약 3초간 영상(86매 또는 88매)을 이용하였으며, 영상의 중앙에 있는 측정선에 대해 실시하였다. 즉, 물리 좌표로 좌안에서 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m인 세 점에 대한 유속을 구하였다.

비교를 위해 프로펠러 지름 2 cm인 미속계를 이용하여 좌안에서 0.05 m 간격으로 15개 지점에 대해 유속을 30초간 측정하였다. 미속계에 의한 유속 측정 결과는 (그림 3-9-87)과 같다. 우안의 유속이 좌안에 비해 약간 빠르며, 이는 고속인 경우에 더욱 편중이 심하다. 이것은 실험 수로 제작시 양쪽이 정확하게 대칭을 이루지 못해 흐름이 편류되는 것이나, 본 연구의 시험에서는 크게 문제가 되지 않는 것으로 보인다.

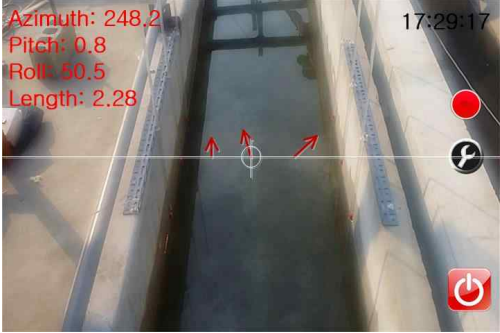
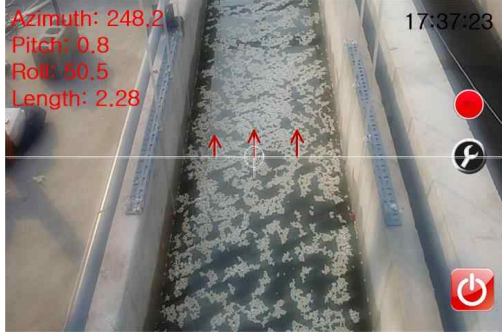

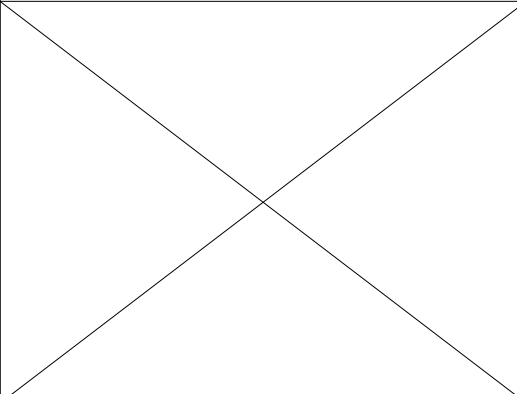


(그림 3-9-87) 실험 수로의 측정 유속

각 경우에 대해 본 연구에서 개발한 스마트폰 영상유속계를 적용하여 측정한 예는 (그림 3-9-88)과 같다. 실제 측정시는 유속은 같은 지점에서라도 시시각각 변화하므로, (그림 3-9-88)에 보인 결과는 측정 도중에 한 순간을 캡처한 것이며, 시간평균유속은 아니다.

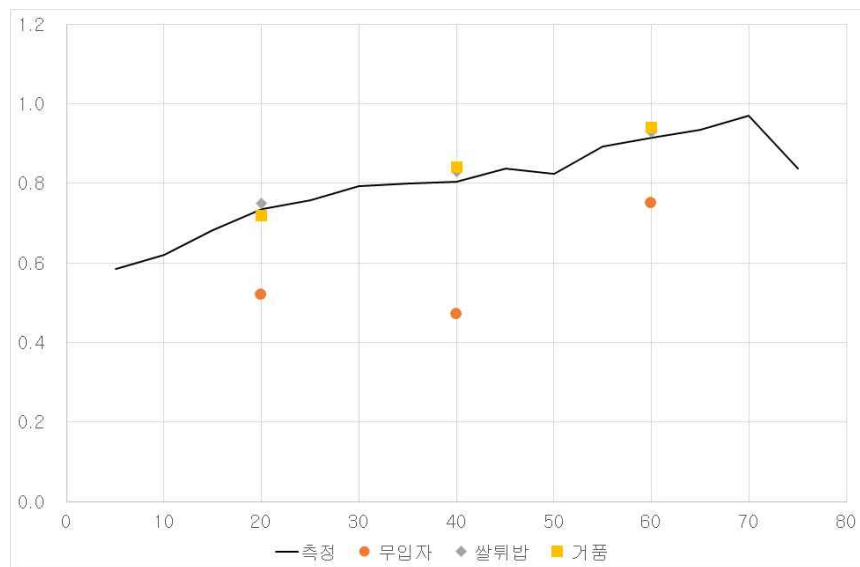
유속	추적자	
	 <p data-bbox="571 616 655 645">무입자</p>	 <p data-bbox="1098 616 1182 645">쌀튀밥</p>
고속	 <p data-bbox="571 983 655 1012">비누거품</p>	
	 <p data-bbox="571 1350 655 1379">무입자</p>	 <p data-bbox="1098 1350 1182 1379">쌀튀밥</p>
중속	 <p data-bbox="571 1718 655 1747">비누거품</p>	

(그림 3-9-88) 표면영상유속계에 의한 유속 측정 결과

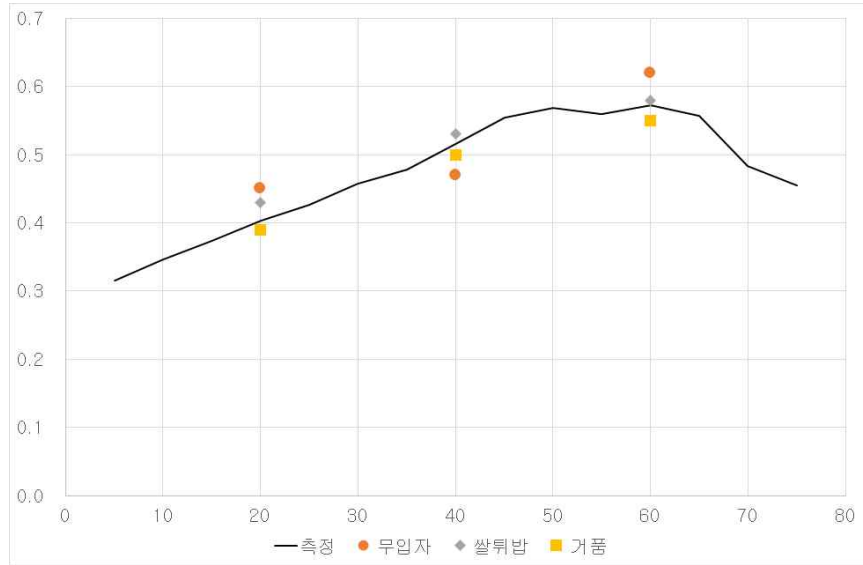
유속	추적자	
저속	 <p data-bbox="571 645 667 678">무입자</p>	 <p data-bbox="1098 645 1193 678">쌀튀밥</p>
	 <p data-bbox="571 1041 667 1075">비누거품</p>	

(그림 3-9-88) 표면영상유속계에 의한 유속 측정 결과 (계속)

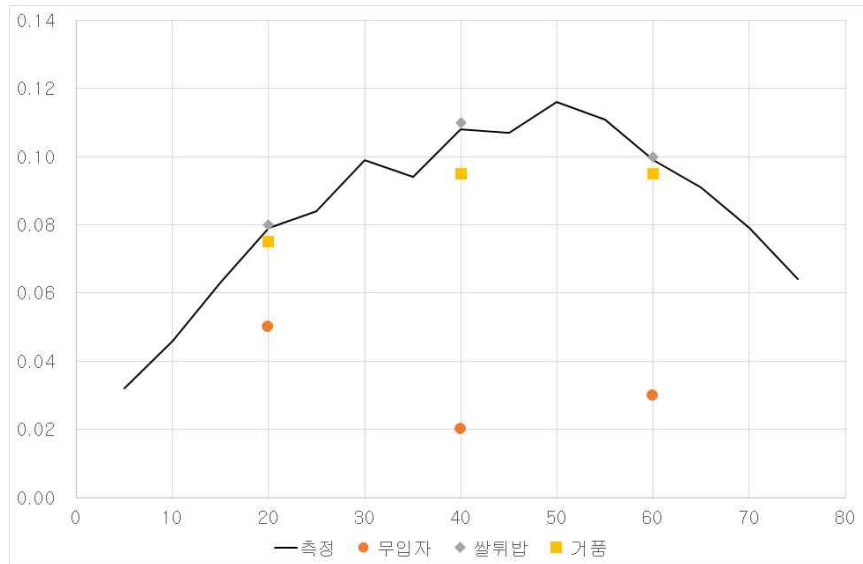
유속 측정은 10초에 1회씩 반복해서 수행되며, 각 측정시 자료는 동영상과 텍스트 파일로 스마트폰 내에 저장된다.



(그림 3-9-89) 고유속시 측정 유속과 영상유속



(그림 3-9-90) 중유속시 측정 유속과 영상유속



(그림 3-9-91) 저유속시 측정 유속과 영상유속

5. 요약 및 결론

본 절에서는 농촌용수구역의 물순환 모니터링을 위하여 국내 및 해외의 시험지구를 선정하고 현장 수리시설 및 현황을 조사하였다. 이를 토대로 시험지구의 모니터링을 수행하여 강우자료, 저수지 유역자료, 저수지 수위 및 농업용수 공급량 자료 등 물순환 해석모형 개발을 위한 기초자료의 품질을 평가하였다. 또한 모니터링 자료의 신뢰도를 제고하기 위해 영상기반의 수위·유량 현장검증 모듈을 개발하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 농촌용수구역의 국내 시험지구는 시험·운영 및 분석이 가능함과 동시에, 일선 물관리기관(한국농어촌공사 지사 혹은 시·군 지자체)에서 실시하고 있는 기존의 모니

터링과의 비교가 가능하고 농업용수 시험지구로써의 대표성을 가지기에 적정한지의 여부 등 다양한 조건을 고려하여 이동지구, 동진지구, 농어촌연구원 시험포장등 총 3개의 대상지구를 선정하였다. 또한 국내 시험지구와 조건이 다른 해외 시험지구를 우즈베키스탄 타슈켄트로 선정하여 모니터링 자료를 비교·분석을 수행하였다.

② 시험지구 모니터링을 실시하여 모니터링 자료의 품질 평가를 수행하고, 농업용수 종합해석 모형 관련 자료를 구축 및 분석하였다. 용덕, 미산, 이동, 은산 강우관측소에서 수집된 강우자료의 품질을 확인하기 위하여 유역내에 위치한 국토교통부 관리 우량관측소의 강우자료와 상관성을 분석하였다. 용덕, 미산, 이동 강우관측소의 강우자료는 이동우량관측소 강우자료와 상관성이 높게 나타났으며, 은산강우관측소의 강우자료는 진위우량관측소의 강우자료와 상관성이 높게 나타났다. 이동지구에서 측정하고 있는 강우자료의 일관성이 평가되었으며, 강우자료 활용에 문제가 없을 것으로 파악되었다. 또한 용덕, 미산, 이동 저수지의 저수위자료와 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 이동지구의 물관리 특성을 반영하여 구축된 저수지 물수지 모형을 사용하여 모의한 결과를 실측자료와 비교하였다. 저수지 물수지 모형의 모의결과와 실측값들은 유사한 경향을 나타냈으며, 품질이 양호한 것으로 나타났으나, 일부자료는 결측자료가 포함되어 있어 자료의 품질이 불량한 것으로 나타났다.

③ 미산교, 묵방교, 덕성교, 재인교의 하천 유출자료의 품질을 확인하기 위하여 수정 Tank 모형을 사용하여 모의한 결과를 실측자료와 비교하였다. 미산교와 묵방교의 유출량 자료는 활용가능한 자료가 2006년에 측정된 자료뿐이었으며, 덕성교와 재인교의 유출량 자료는 실측값과 모의결과가 유사한 경향을 나타냈다. 이동지구 수문 및 농업용수관련 자료의 품질은 결측자료가 없고 수위-유량관계가 수립된 연도에는 양호한 것으로 나타났으며, 결측자료가 있거나 해당 연도에 수위-유량관계가 수립되지 않은 경우에는 품질이 불량하여 사용하기 어려운 것으로 나타났다.

④ 동진지구는 저수지와 관개수로로 구분하여 사전조사를 실시하였다. 강우자료와 수위 자료로 나누어 데이터를 구축하였으며 강우자료는 2011년 1월부터 2013년 12월까지 지구내 관측지구별 일강우 데이터를 구축하였다. 또한 금평, 대화 등 저수지 유역자료를 추가 조사·수집하였다. 지구 내 용수지선에서의 수위-유량 관계식을 산정하였으며, 지점 및 데이터의 특성을 고려하여 2012년부터 2013년까지의 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 시점 및 말단 유량 비교 자료와 농업용수 공급량 비교 자료를 구축하였다.

⑤ 시험포장 강우관측소의 강우자료의 품질을 확인하기 위하여 인접한 수집된 강우자료를 국토교통부 반월1우량관측소와 수원기강대의 강우자료와 상관성을 분석하였다. 시험포장 강우관측소와 반월1우량관측소, 시험포장 강우관측소와 수원기강대의 강우자료는 각각 높은 상관성을 나타냈다. 그러나 총강우량은 관측소 사이에 상이한 결과를 나타냈다. 또한 시험포장 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 시험포장의 물관리 특성을 반영하여 구축된 농업용수 공급량 모형을 사용하여 모의한 결과를 실측자료와 비교하였다. 농업용수 공급량 모형의 모의결과와 실측값들은 유사한 경향을 나타냈으며, 시험포장 농업용수 공급량 자료의 품질이 양호한 것으로 나타났다.

⑥ 영상기반 수위·유량 현장검증을 위해 안드로이드 기반의 스마트폰을 이용한 휴대

용 표면영상유속계 모듈을 개발하였다. 스마트폰에 내장된 카메라를 이용하여 영상을 촬영하고, 내장된 CPU로 이를 직접 분석하는 기능을 지니고 있으므로, 현장에서 직접 실시간으로 유속 분석을 할 수 있다. 또한 내장된 방향센서를 이용하여 참조점을 대신하므로, 영상 변환을 위한 번거로운 측량 작업을 필요로 하지 않으며 데이터베이스와 연계할 경우 손쉽게 결과를 전송할 수 있다.

제 10 절 농업용수 해석모형의 적용성 평가

1. 서 론

우리나라 농업유역의 물순환을 모델링하기 위해서는 저수지 상류유역, 저수지, 저수지 하류유역의 물순환이 복합적으로 연계되고 복잡한 특징을 가진다. 모의요소로는 상류 유출량, 상류 증발산량, 상류 수질, 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 환경요수 방류량, 저수지 수면 강우량, 저수지 수면 증발량, 저수지 수질, 하류 유출량, 관개지구 배수량, 송수손실량, 관개지구 증발산량 등이 있다.

컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 종합해석 Framework인 COMFARM은 기존에 널리 사용되던 SWAT이나 HSPF이 고려하지 못하고 있는 농업용 저수지 운영기작과 논의 물수지 등의 우리나라 유역의 특징을 반영하여 사용자가 농촌용수 물순환과 관련된 다양한 목적에 대해 맞춤형으로 모형을 설계할 수 있도록 개발되었다.

COMFARM은 전처리 시스템, 주 객체 처리 시스템, 후처리 시스템으로 크게 구분된다. 전처리 시스템에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 방대한 자료를 관리할 수 있는 자료 관리 및 표준화 시스템 (RWR-DMS, RWR-DSS)과 연동하여 맞춤형 모형에 필요한 입력 자료 (기상, 지형, 영농자료)를 제공하며, 주 객체 처리 시스템에서는 객체 지향 모델링 기법 기반의 플랫폼을 통해 사용자의 이용 목적에 맞는 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하고, 후처리 시스템에서는 사용자가 구축한 맞춤형 모형의 매개변수를 자동 보정 및 검정하는 최적화 모듈과 그래프, 표, 보고서를 출력할 수 있는 모듈을 제공한다.

본 절에서는 농업용수 물순환 종합해석 모형인 COMFARM을 자료품질이 양호한 동진지구를 중심으로 대화, 금평, 당월, 선암저수지 유역의 저수지 물수지 해석 적용성을 평가하였다. 또한 용수 수급상황이 실시간으로 모니터링이 되고 있는 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 수로 수위자료를 구축하여 농업용수 공급량 모형의 적용성을 분석 및 평가하였다.

2. 저수지 유역 모형의 적용

2.1. 대상유역

본 연구에서는 COMFARM의 저수지 물수지 해석 적용성을 평가하기 동진지구에 위치한 대화, 금평, 당월, 선암 저수지를 대상으로 저수지의 수위 관측 자료를 수집하였다. 대상저수지는 한국농어촌공사 관할 저수지로 수위를 실시간으로 측정하고 있다.

대화저수지는 1967년에 준공된 저수지로서 전라북도 김제시 금구면 산동리에 위치하며 제당의 제고는 9.6 m, 제장 226 m, 제당형식은 필댐이다. 금평저수지는 1961년에 준공된 저수지로서 전라북도 김제시 금산면 금산리에 위치하며 제당의 제고는 18.4 m, 제장 443 m, 제당형식은 필댐이다. 당월저수지는 1997년에 준공된 저수지로서 전라북도 김제시 금구면 월전리에 위치하며 제당의 제고는 30.8 m, 제장 222 m, 제당형식은 필댐이다. 선암저수지는 1941년에 준공된 저수지로서 전라북도 김제시 금구면 선암리에 위치하며 제당의 제고는 14.0 m, 제장 124 m, 제당형식은 필댐이다.

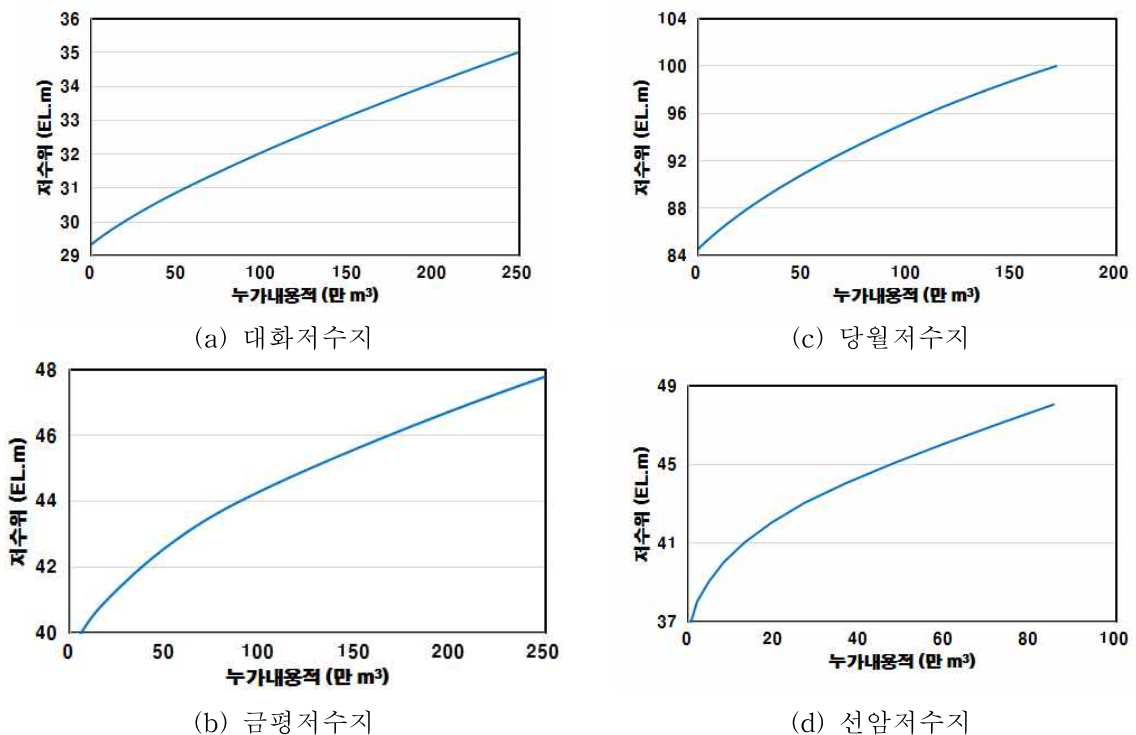
2.2. 모형의 입력자료

COMFARM의 저수지 물수지 해석 컴포넌트 적용을 위한 입력자료 구축을 위해 대상 저수지의 상류유역 면적 및 토지이용, 관개면적, 만수위, 사수위 등의 자료를 한국 농어촌공사 제공 보고서 및 GIS를 통해 조사하였으며, 정리하면 <표 3-10-1>과 같다.

대화저수지 상류유역은 면적 1,840 ha, 논 20.3 % 밭 13.5 % 산림이 31.1 %를 차지하고 있다. 대화저수지는 총저수량은 2,721 천^m³으로서 농업용저수지로는 규모가 큰 편이고, 제고형식은 필댐으로 제고는 9.6 m이고 댐 길이는 226 m이다. 관리수위는 사수위 EL.29.3 m, 만수위는 EL.34.8 m로 관리되고 있다. 금평저수지 상류유역은 면적 2,571 ha, 논 15.2 % 밭 16.0 % 산림이 17.6 %를 차지하고 있다. 금평저수지는 총저수량은 5,267 천^m³으로서 농업용저수지로는 규모가 큰 편이고, 제고형식은 필댐으로 제고는 18.4 m이고 댐 길이는 443 m이다. 관리수위는 사수위 EL.39.2 m, 만수위는 EL.52.7 m로 관리되고 있다. 당월저수지 상류유역은 면적 238 ha, 논 7.1 % 밭 19.7 % 산림이 71.4 %를 차지하고 있다. 당월저수지는 제고 30.8 m이고 댐 길이는 222 m이다. 관리수위는 사수위 EL.78.0 m, 만수위는 EL.96.0 m로 관리되고 있다. 선암저수지 상류유역은 면적 523 ha, 논 14.0 % 밭 8.8 % 산림이 54.4 %를 차지하고 있다. 선암저수지는 총저수량은 854 천^m³으로서 농업용저수지로는 규모가 큰 편이고, 제고형식은 필댐으로 제고는 14.0 m이고 댐 길이는 124 m이다. 관리수위는 사수위 EL.37.0 m, 만수위는 EL.48.0 m로 관리되고 있다.

한편, 저수지 물수지 해석을 위해서는 저수지의 표고에 따른 내용적 자료가 필요하다. (그림 3-10-1)은 대화, 금평, 당월, 선암의 표고별 면적 및 내용적 곡선을 보여주고 있다.

기상자료는 전주기상청 자료를 수집하였으며 유출량, 증발산량, 유효우량, 필요수량, 저수지 수면 강우량, 수면 증발량 등의 모의를 위해 이용하였다.



(그림 3-10-1) 대상저수지의 표고별 내용적 곡선

<표 3-10-1> 대상지구 지형특성 및 저수지 제원

특성		대화저수지	금평저수지	당월저수지	선암저수지
상류 유역	면적 (ha)	1,840.0	2,571.0	238.0	523.0
	논 비율 (%)	20.3	15.2	7.1	14.0
	밭 비율 (%)	13.5	16.0	19.7	8.8
	산림비율(%)	31.1	17.6	71.4	54.4
저수지 제원	관개면적 (ha)	808.0	1,000.0	138.0	224.0
	총 저수량 (만 m^3)	272.1	526.7	171.0	85.4
	만수위(m)	34.8	52.7	96.0	48.0
	사수위(m)	29.3	39.2	78.0	37.0

2.3. 모형의 보정방법

COMFARM의 저수지 물수지 해석 컴포넌트에서는 유전자 알고리즘 및 Simulated Annualing 등의 최적화 기법을 이용하여 모형의 자동 보정을 지원한다. 기존의 DIROM, HOMWRS 등의 모형은 저수지 설계를 위해 주로 사용되었으며 실측치와 비교하여 모형의 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는지에 대한 연구는 부족하였다. Yoo et al. (2013)의 연구에서는 DIROM 모형을 이용하여 기후변화 및 토지이용변화에 따른 농업용 저수지의 미래 저수량 변화에 관한 연구를 수행한 바 있으나, DIROM의 매개변수의 불확실성에 의한 모의치의 불확실성에 대한 한계를 고찰한 바 있다.

본 연구에서는 우리나라에서 주로 이용되었던 DIROM 및 HOMWRS 등의 모형에서 문제가 되었던 부분을 개선하였다. 본 연구에서는 개발된 모형이 실제 저수지의 용수 공급 및 방류패턴을 잘 반영하는지를 평가하기 위해서 대화, 당월, 금평, 선암저수지에 대해 모의 저수지 수위와 실측 저수지 수위를 비교하였다. 모의 저수지 수위와 실측 저수지 수위를 비교하기 위한 방법으로 모형의 보정 및 검정방법을 선택하였다. 보정 및 검정결과를 평가하기 위해서 통계적 방법 및 도식적 방법을 동시에 이용하였다.

COMFARM의 저수지 물수지 해석 컴포넌트의 매개변수는 크게 ① 저수지 유입량 (수정 3단 Tank 모형) 관련 매개변수, ② 농업용수 공급량 관련 매개변수, ③ 저수지 운영 시기 관련 매개변수로 구분된다. 저수지 유입량은 본 연구 개발 모형을 실제 운영하는 저수지에 적용을 하는 경우 실측치를 획득하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 대부분의 농업용 저수지의 상류 유역은 미계측지역인 점을 고려하여 저수지 유입량 관련 매개변수는 본 연구에서 보정하지 않았으며 김현영 (1988) 및 본 연구 개발 회귀식에 도출된 매개변수를 이용하였다. 따라서 농업용수 공급량 및 저수지 운영 시기 관련 매개변수만을 보정하였다.

2.4. 모형의 보정과 검정

본 연구에서는 COMFARM의 저수지 물수지 해석 적용성 평가를 위해 대상저수지인 대화, 금평, 당월, 선암 저수지에 대해 저수지 수위를 모의하였고 실측 저수지 수위와 비교하였다. 모형의 평가를 위해서는 통계적 변량과 도식적인 방법을 동시에 이용하였다.

가. 대화저수지

본 연구에서는 COMFARM을 이용하여 대화저수지의 수위를 모의하였고, 실측 저수지 수위를 이용하여 보정 및 검정하였다. 모형의 보정기간은 2011년이고 검정기간은 2012년이다.

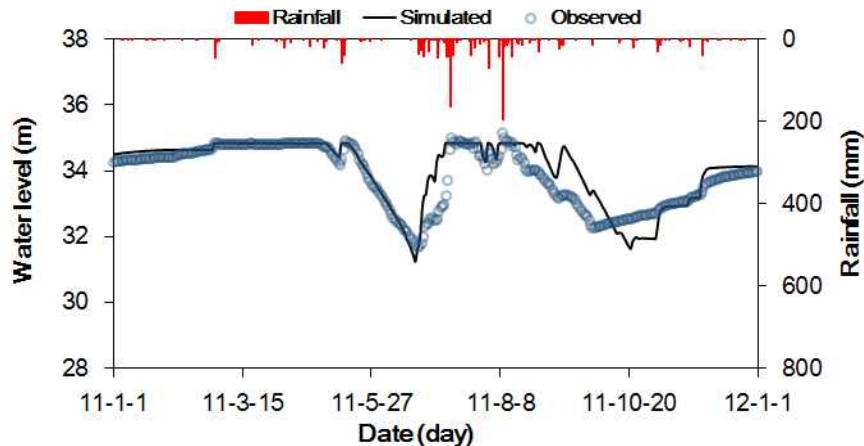
<표 3-10-2>는 유전자 알고리즘을 이용하여 보정한 매개변수를 보여주고 있다. 매개변수는 물꼬 높이 52.9 mm, 최소담수심 48.3 mm, 일 최대 관개량 19.8 mm, 침투량 1.4 mm, 관개효율은 2011년의 경우 30 %, 2012년의 22 %에서, 관개기 4월 30일 - 10월 25일, 중간낙수기 7월 12일 - 7월 28일의 경우 모의 수위가 실측 수위의 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

보정 및 검정기간동안 통계적 변량은 <표 3-10-3>과 같다. 보정기간동안 RMSE는 0.23 m, R²는 0.79, NSE는 0.76, d는 0.93으로 나타났고, 검정기간동안 RMSE는 0.59 m, R²는 0.56, NSE는 0.50, d는 0.86으로 나타났다. 모형의 평가를 위한 선행연구에 의한 기준에 의하면 R²가 0.5 이상으로 'acceptable'인 것으로, NSE가 0.75 이상으로 'very good'인 것으로 나타났다 (Moriassi et al., 2007).

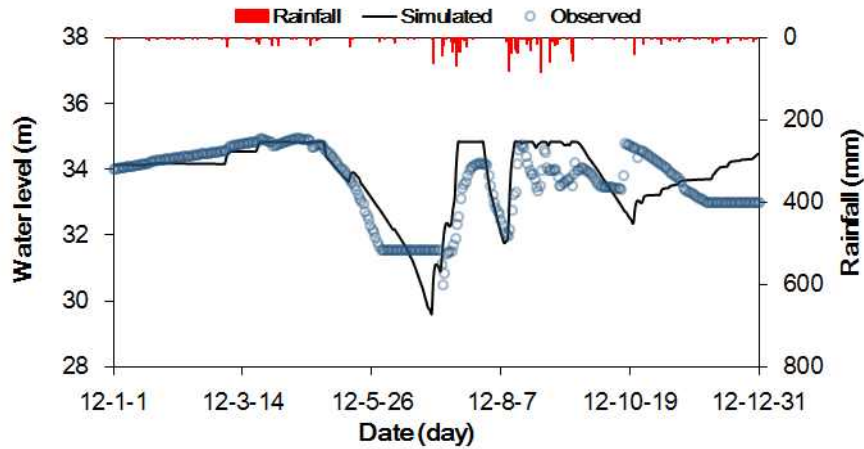
(그림 3-10-2)와 (그림 3-10-3)은 보정 및 검정 기간의 일별 수위 변화를 실측치와 모의치에 대해 보여주고 있다. 대화저수지의 농업용수 공급은 5월에 시작되어 실측 수위가 내려가기 시작했다. 관개기의 모의 수위는 실측 수위의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타나 COMFARM의 농업용수 공급량 모의 방식은 실제 저수지 운영을 반영하는 것으로 판단된다. 홍수기에는 모의 수위가 만수위 (34.8 m)까지 올라가는 것으로 나타났다. (그림 3-10-4)는 보정기간의 일별 실측수위와 모의수위에 대한 상관관계식을 도식적으로 나타낸 것이다. 상관관계식의 기울기는 0.93으로 나타났다.

<표 3-10-2> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(대화저수지)

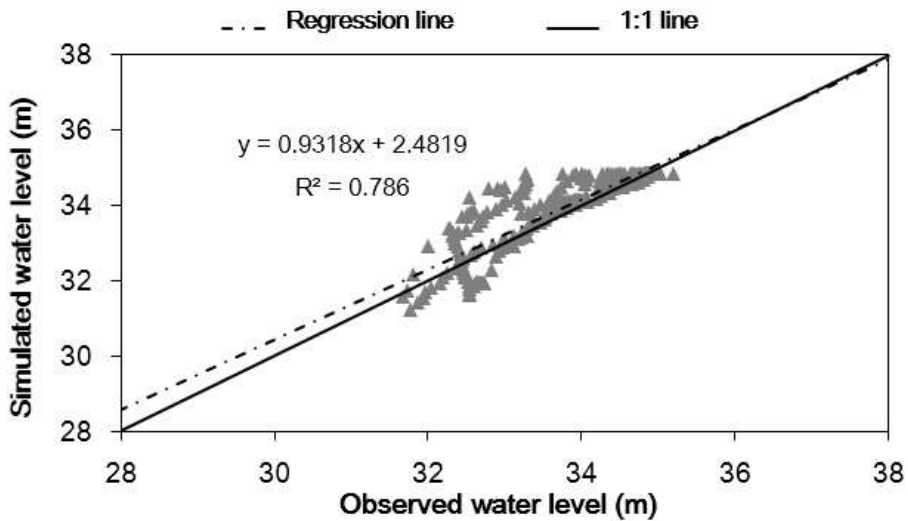
매개변수	일최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	침투량 (mm)	관개효율 (%)		관개기	중간 낙수기
					2011년	2012년		
보정치	19.8	52.9	48.3	1.4	30	22	4월30일-10월25일	7월12일-7월28일



(그림 3-10-2) 대화저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-3) 대화저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-4) 대화저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교

<표 3-10-3> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (대화저수지)

저수지	기간	통계적 변량			
		RMSE (m)	R ²	NSE	d
대화	보정	0.23	0.79	0.76	0.93
	검정	0.59	0.56	0.50	0.86

나. 금평저수지

다음으로, 금평저수지의 수위를 모의하고 실측 저수지 수위를 이용하여 보정 및 검정 하였다. 모형의 보정기간은 2011년이고 검정기간은 2012년이다.

<표 3-10-4>는 유전자 알고리즘을 이용하여 보정한 매개변수를 보여주고 있다. 매개 변수는 물꼬 높이 100.7 mm, 최소담수심 36.6 mm, 일 최대 관개량 10.4 mm, 침투량 2.3 mm, 관개효율은 2011년의 경우 36 %, 2012년의 13 %에서, 관개기 5월 15일 - 10월 9

일, 중간낙수기 7월 20일 - 7월 29일의 경우 모의 수위가 실측 수위의 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

보정 및 검정기간동안 통계적 변량은 <표 3-10-5>와 같다. 보정기간동안 RMSE는 0.42 m, R^2 는 0.83, NSE는 0.80, d는 0.94으로 나타났고, 검정기간동안 RMSE는 0.50 m, R^2 는 0.86, NSE는 0.85, d는 0.96으로 나타났다. 모형의 평가를 위한 선행연구에 의한 기준에 의하면 R^2 가 0.5 이상으로 'acceptable'인 것으로, NSE가 0.75 이상으로 'very good'인 것으로 나타났다 (Moriassi et al., 2007).

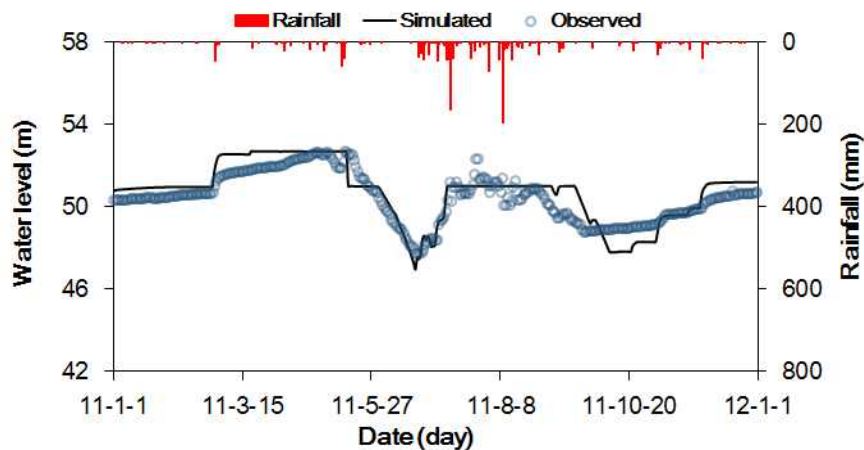
(그림 3-10-5)와 (그림 3-10-6)은 보정 기간의 일별 수위 변화를 실측치와 모의치에 대해 보여주고 있다. 대화저수지의 농업용수 공급은 5월에 시작되어 실측 수위가 내려가기 시작했다. 관개기의 모의 수위는 실측 수위의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타나 COMFARM의 농업용수 공급량 모의 방식은 실제 저수지 운영을 반영하는 것으로 판단된다. 홍수기에는 모의 수위가 만수위 (52.7 m)까지 올라가는 것으로 나타났다. (그림 3-10-7)은 보정기간의 일별 실측수위와 모의수위에 대한 상관관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 상관관계식의 기울기는 1.09으로 나타났다.

<표 3-10-4> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(금평저수지)

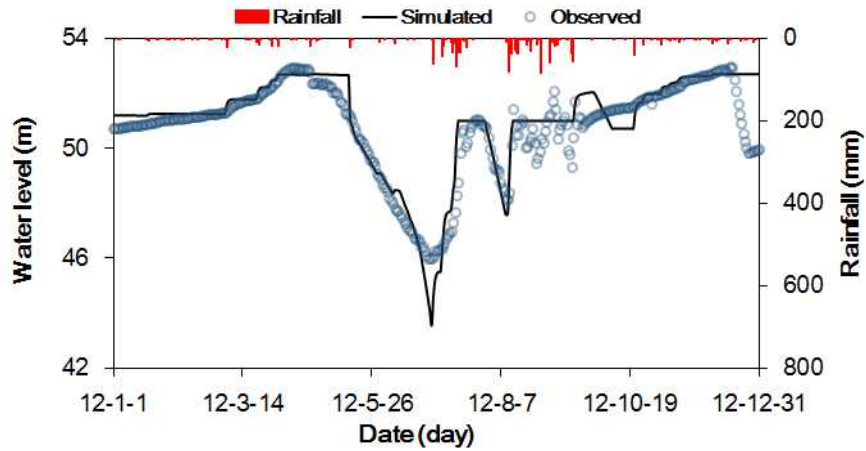
매개변수	일최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	침투량 (mm)	관개효율 (%)		관개기	중간 낙수기
					2011년	2012년		
보정치	10.4	100.7	36.6	2.3	36	13	5월15일-10월9일	7월20일-7월29일

<표 3-10-5> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (금평저수지)

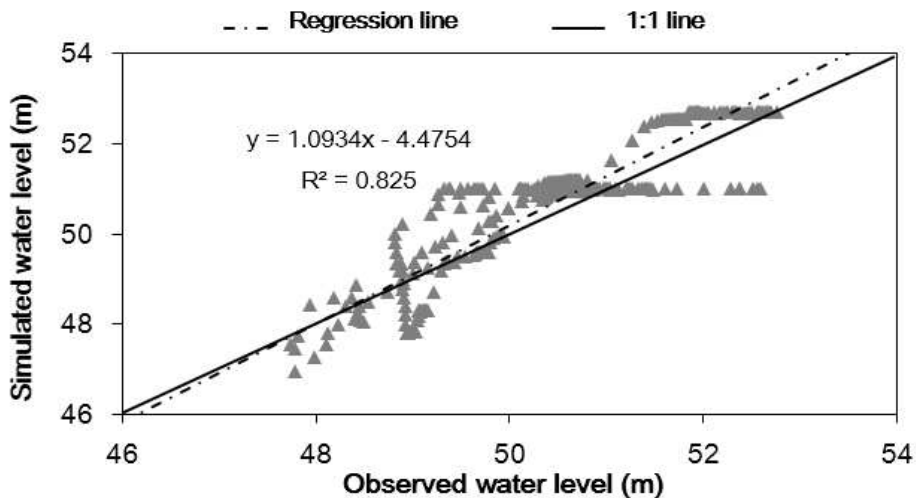
저수지	기간	통계적 변량			
		RMSE (m)	R^2	NSE	d
금평	보정	0.42	0.83	0.80	0.94
	검정	0.50	0.86	0.85	0.96



(그림 3-10-5) 금평저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-6) 금평저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-7) 금평저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교

다. 당월저수지

마찬가지로, 당월저수지의 수위를 모의한 후 실측 저수지 수위를 이용하여 보정 및 검정하였다. 모형의 보정기간은 2011년이고 검정기간은 2012년이다.

<표 3-10-6>은 유전자 알고리즘을 이용하여 보정한 매개변수를 보여주고 있다. 매개변수는 물꼬 높이 61.5 mm, 최소담수심 17.9 mm, 일 최대 관개량 10.1 mm, 침투량 6.4 mm, 관개효율은 2011년의 경우 61 %, 2012년의 43 %에서, 관개기 5월 25일 - 9월 22일, 중간낙수기 6월 30일 - 7월 10일의 경우 모의 수위가 실측 수위의 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

보정 및 검정기간동안 통계적 변량은 <표 3-10-7>과 같다. 보정기간동안 RMSE는 0.48 m, R^2 는 0.90, NSE는 0.85, d는 0.95으로 나타났고, 검정기간동안 RMSE는 0.53 m, R^2 는 0.93, NSE는 0.92, d는 0.98으로 나타났다. 모형의 평가를 위한 선행연구에 의한 기준에 의하면 R^2 가 0.5 이상으로 'acceptable'인 것으로, NSE가 0.75 이상으로 'very good'인 것으로 나타났다 (Moriassi et al., 2007).

(그림 3-10-8)과 (그림 3-10-9)는 보정 기간의 일별 수위 변화를 실측치와 모의치에

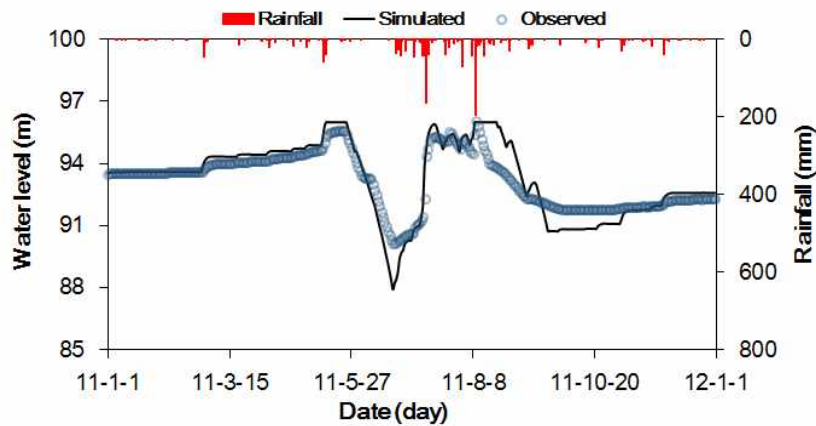
대해 보여주고 있다. 대화저수지의 농업용수 공급은 5월에 시작되어 실측 수위가 내려가기 시작했다. 관개기의 모의 수위는 실측 수위의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타나 COMFARM의 농업용수 공급량 모의 방식은 실제 저수지 운영을 반영하는 것으로 판단된다. 홍수기에는 모의 수위가 만수위 (96.0 m)까지 올라가는 것으로 나타났다. (그림 3-10-10)은 보정기간의 일별 실측수위와 모의수위에 대한 상관관계식을 도식적으로 나타낸 것이다. 상관관계식의 기울기는 1.28으로 나타났다.

<표 3-10-6> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(당월저수지)

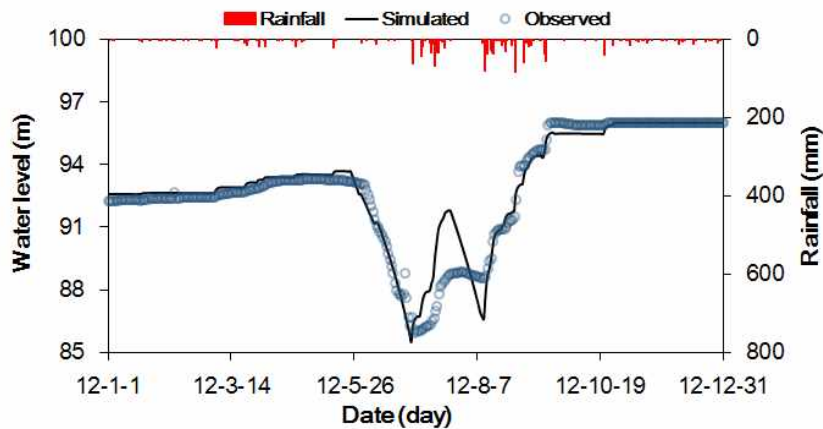
매개변수	일최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	침투량 (mm)	관개효율 (%)		관개기	중간 낙수기
					2011년	2012년		
보정치	10.1	61.5	17.9	6.4	61	43	5월25일-9월22일	6월30일-7월 10일

<표 3-10-7> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (당월저수지)

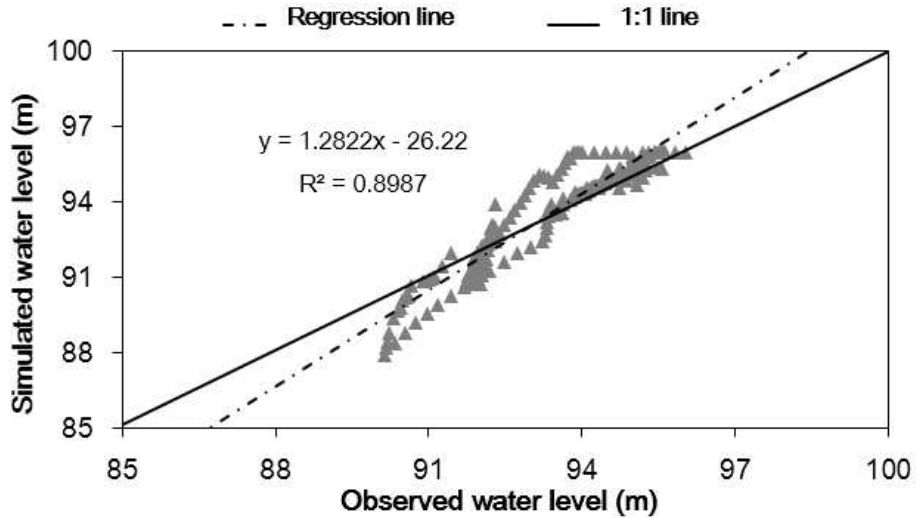
저수지	기간	통계적 변량			
		RMSE (m)	R ²	NSE	d
당월	보정	0.48	0.90	0.85	0.95
	검정	0.53	0.93	0.92	0.98



(그림 3-10-8) 당월저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-9) 당월저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-10) 당월저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교

라. 선암저수지

마지막으로 선암저수지의 수위를 모의하고 실측 저수지 수위를 이용하여 보정 및 검정하였다. 모형의 보정기간은 2011년이고 검정기간은 2012년이다.

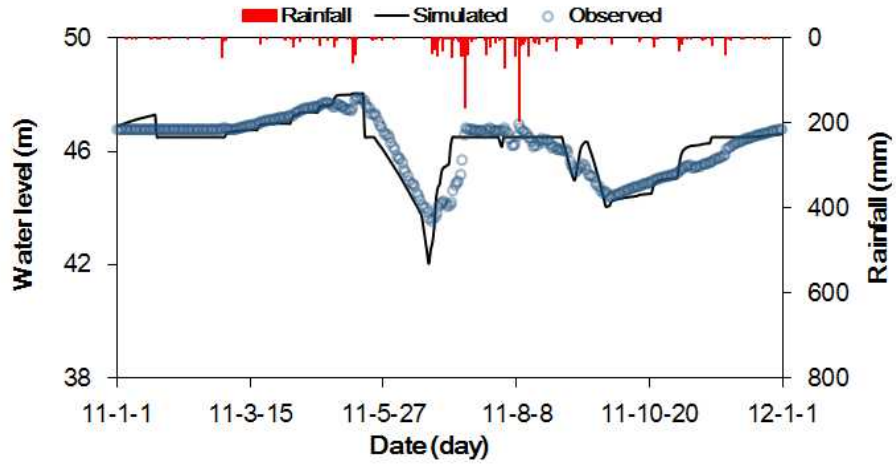
<표 3-10-8>은 유전자 알고리즘을 이용하여 보정한 매개변수를 보여주고 있다. 매개변수는 물꼬 높이 94.9 mm, 최소담수심 11.2 mm, 일 최대 관개량 11.3 mm, 침투량 4.9 mm, 관개효율은 2011년의 경우 65 %, 2012년의 58 %에서, 관개기 6월 18일 - 9월 26일, 중간낙수기 7월 28일 - 7월 29일의 경우 모의 수위가 실측 수위의 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 나타났다.

보정 및 검정기간동안 통계적 변량은 <표 3-10-9>와 같다. 보정기간동안 RMSE는 0.24 m, R²는 0.79, NSE는 0.79, d는 0.94으로 나타났고, 검정기간동안 RMSE는 0.30 m, R²는 0.83, NSE는 0.81, d는 0.95으로 나타났다. 모형의 평가를 위한 선행연구에 의한 기준에 의하면 R²가 0.5 이상으로 'acceptable'인 것으로, NSE가 0.75 이상으로 'very good'인 것으로 나타났다 (Moriassi et al., 2007).

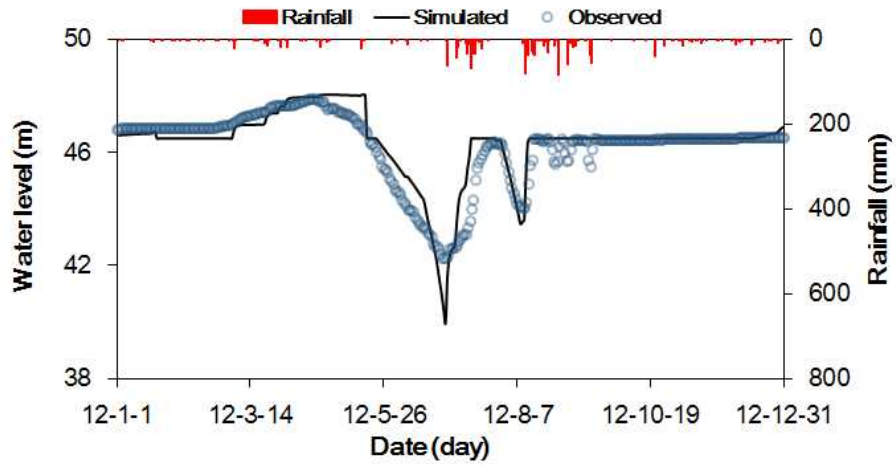
(그림 3-10-11)과 (그림 3-10-12)는 보정 기간의 일별 수위 변화를 실측치와 모의치에 대해 보여주고 있다. 대화저수지의 농업용수 공급은 5월에 시작되어 실측 수위가 내려가기 시작했다. 관개기의 모의 수위는 실측 수위의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타나 COMFARM의 농업용수 공급량 모의 방식은 실제 저수지 운영을 반영하는 것으로 판단된다. 홍수기에는 모의 수위가 만수위 (48.0 m)까지 올라가는 것으로 나타났다. (그림 3-10-13)은 보정기간의 일별 실측수위와 모의수위에 대한 상관관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 상관관계식의 기울기는 0.92으로 나타났다.

<표 3-10-8> 저수지 물수지 해석 모형의 매개변수 보정치(선암저수지)

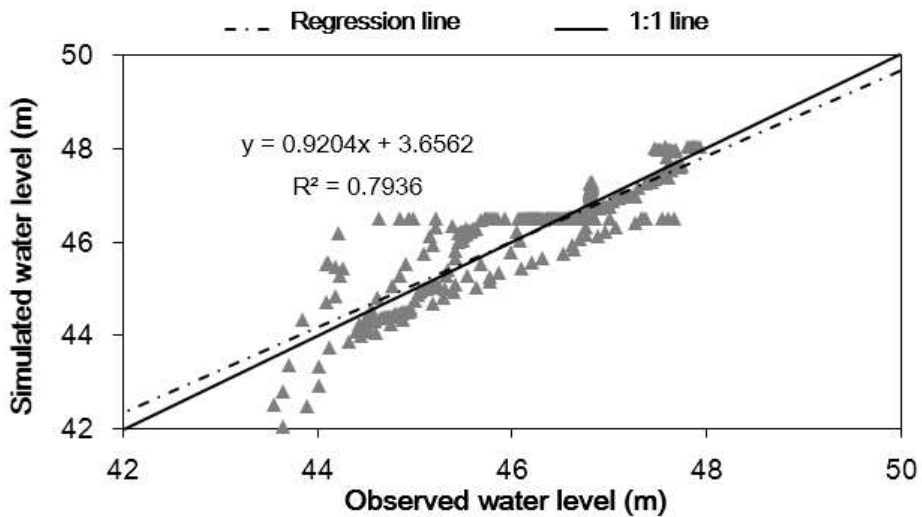
매개변수	일최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	침투량 (mm)	관개효율(%)		관개기	중간낙수기
					2011년	2012년		
보정치	11.3	94.9	11.2	4.9	65	58	6월18일-9월26일	7월28일-7월 29일



(그림 3-10-11) 선암저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-12) 선암저수지의 검정기간동안 실측 및 모의 수위 비교



(그림 3-10-13) 선암저수지의 보정기간동안 실측 및 모의 수위 비교

<표 3-10-9> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (선암저수지)

저수지	기간	통계적 변량			
		RMSE (m)	R ²	NSE	d
선암	보정	0.24	0.79	0.79	0.94
	검정	0.30	0.83	0.81	0.95

3. 농업용수 공급량 모형의 적용

3.1. 대상지구

본 연구에서는 COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트 (농업용수 공급량 모형) 적용성 평가를 위하여 한국농어촌공사에서 자동수위계측 시스템을 이용하여 용수 수급상황이 모니터링 되고 있는 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 수로 수위자료를 구축하였다.

<표 3-10-10>은 동진지구 관개용수 공급체계 현황을 보여주고 있다. 화호지선과 대평지선은 목-일요일, 감곡지선은 금-월요일, 용성지선은 화-금요일, 종신지선은 월-목요일에 용수공급을 수행하고 있다.

<표 3-10-10> 동진지구 관개면적 및 용수 공급체계 현황 (남원호 등, 2013)

지선	관개면적 (ha)	용수공급	수로측정 범위 (m)	수위-유량 관계식	결정계수 (R ²)
화호	415.9	목 - 일	0 - 0.70	$Q = 1.4354H^{2.3158}$	0.9967
대평	1,008.0	목 - 일	0 - 1.20	$Q = 3.184H^{1.5175}$	0.9991
감곡	823.0	금 - 월	0 - 1.25	$Q = 1.5354H^{2.3553}$	0.9871
신용	212.7	금 - 일	0 - 0.84	$Q = 1.23867H^{1.0231}$	0.9999
용성	682.5	수 - 금	0 - 0.95	$Q = 1.6862H^{1.7136}$	0.9962
종신	332.0	월 - 목	0 - 1.29	$Q = 0.9129H^{4.6303}$	0.9989

3.2. 모형의 입력자료

COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트 (농업용수 공급량 모형)의 모의를 위한 입력자료는 일별 강우량, 상대습도, 일사량, 풍속과 작물계수, 관개지구 침투량, 일 최대 관개량, 최소담수심, 최대담수심 (물꼬높이), 본답기, 이앙기, 중간낙수기, 관개효율, 그리고 이앙용수량을 필요로 한다. 강우량, 상대습도, 일사량, 풍속은 잠재증발산량을 산정하는데 이용된다. 작물계수는 유승환 등 (2006)이 도출한 결과를 이용하였다. 관개지구 침투량, 일 최대 관개량, 최소담수심, 물꼬높이, 본답기, 이앙기, 중간낙수기, 관개효율, 이앙용수량 등의 매개변수는 불확실성이 큰 매개변수로 본 연구에서는 모형의 보정을 위한 매개변수로 이용되었다. 모형의 보정을 위해 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등의 시점부 농업용수 공급량을 실측자료를 확보하였다. 모형의 보정방법으로 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 방법을 이용하였다.

3.3. 모형의 검정

가. 화호지선

본 연구에서는 COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트를 화호지선 관개지구의 2012-2013년에 대해 적용하여 농업용수 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가

하였다. <표 3-10-11>은 보정된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-12>는 통계적 변량을 이용하여 적용성을 평가한 결과를 나타낸다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 6.3 mm, 일 최대 관개량 24.1 mm, 물꼬높이 44.6 mm, 최소담수심 16.8 mm, 본답기 5월 6일 - 9월 10일, 이앙기 4월 26일 - 6월 9일, 중간낙수기 7월 15일 - 7월 27일, 관개효율 29.9 %, 이앙용수량 113.0 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 2.3 mm 일 최대 관개량 19.7 mm, 물꼬높이 75.5 mm, 최소담수심 17.2 mm, 본답기 5월 11일 - 9월 20일, 이앙기 5월 4일 - 6월 29일, 중간낙수기 6월 30일 - 7월 19일, 관개효율 68.3 %, 이앙용수량 282.0 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 1173.26 mm/10days, R²는 0.87, NSE는 0.87, d는 0.97로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 969.36 mm/10days, R²는 0.66, NSE는 0.71, d는 0.91로 나타났다.

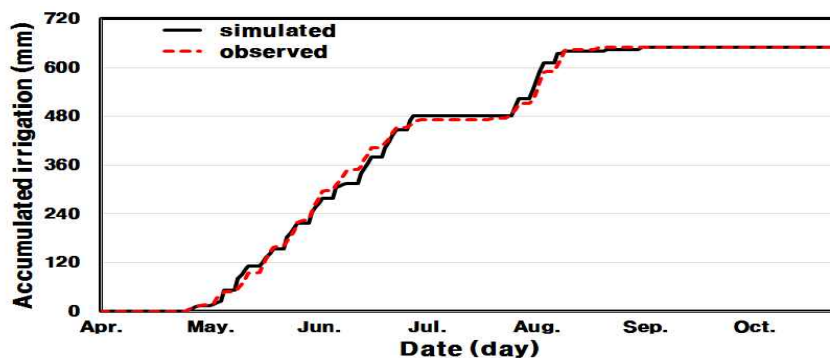
(그림 3-10-14)와 (그림 3-10-15)는 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-16)은 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 0.99로 나타났다.

<표 3-10-11> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (화호지선)

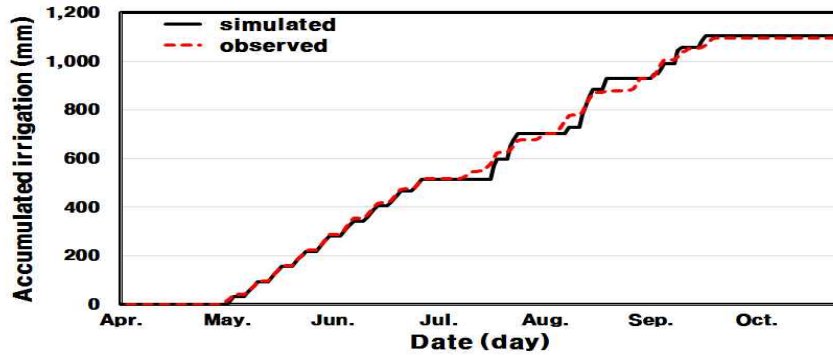
매개변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이앙기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이앙 용수량 (mm)
2012	6.3	24.1	44.6	16.8	5. 6 -9. 10	4. 26 -6. 9	7. 15 -7. 27	29.9	113.0
2013	2.3	19.7	75.5	17.2	5. 11 -9. 20	5. 4 -6. 29	6. 30 -7. 19	68.3	282.0

<표 3-10-12> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (화호지선)

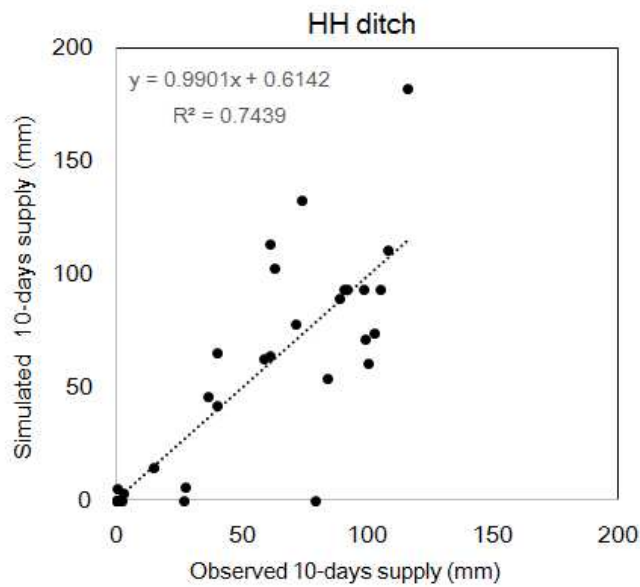
관개 지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
화호 지선	2012	1173.26	0.87	0.87	0.97
	2013	969.36	0.66	0.71	0.91



(그림 3-10-14) 화호지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-15) 화호지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-16) 화호지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

나. 대평지선

다음으로, 대평지선 관개지구의 2012-2013년에 대해 적용하여 농업용수 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가하였다. <표 3-10-13>은 보정된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-14>는 통계적 변량을 이용하여 적용성을 평가한 결과를 나타낸다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 4.7 mm, 일 최대 관개량 10.4 mm, 물꼬높이 101.3 mm, 최소담수심 27.7 mm, 본답기 5월 12일 - 9월 22일, 이양기 5월 3일 - 5월 11일, 중간낙수기 6월 16일 - 6월 16일, 관개효율 54.0 %, 이양용수량 85.9 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 6.4 mm 일 최대 관개량 13.0 mm, 물꼬높이 97.9 mm, 최소담수심 28.8 mm, 본답기 5월 5일 - 9월 20일, 이양기 4월 19일 - 6월 19일, 중간낙수기 6월 30일 - 7월 5일, 관개효율 56.3 %, 이양용수량 159.2 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 995.41 mm/10days, R²는 0.94, NSE는 0.94, d는 0.98로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 821.62 mm/10days, R²

는 0.75, NSE는 0.79, d는 0.94으로 나타났다.

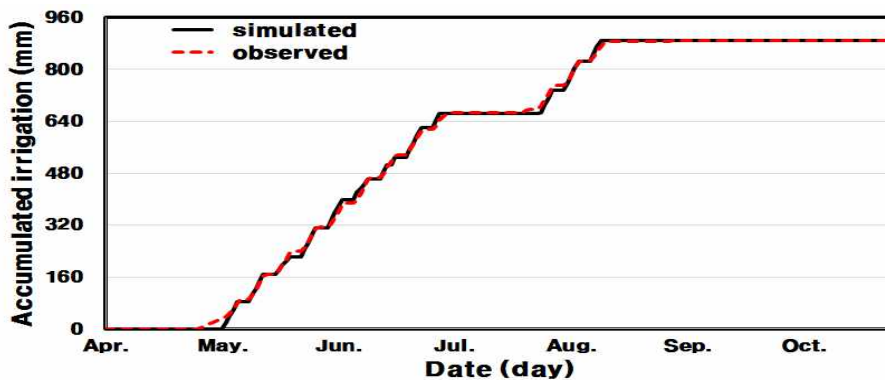
(그림 3-10-17)과 (그림 3-10-18)은 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-19)는 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 1.04로 나타났다.

<표 3-10-13> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (대평지선)

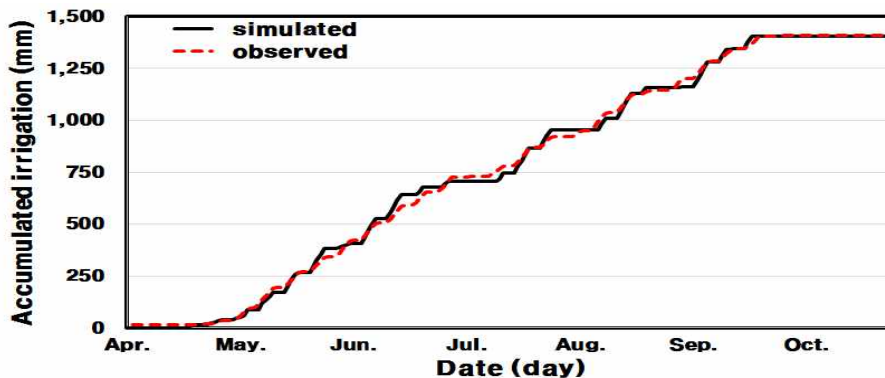
매개변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이앙기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이앙 용수량 (mm)
2012	4.7	10.4	101.3	27.7	5.12 -9.22	5.3 -5.11	6.16 -6.16	54.0	85.9
2013	6.4	13.0	97.9	28.8	5.5 -9.20	4.19 -6.19	6.30 -7.5	56.3	159.2

<표 3-10-14> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (대평지선)

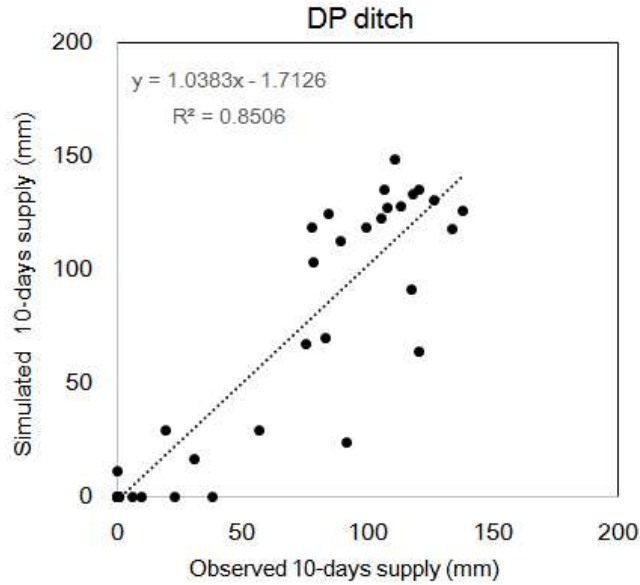
관개지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
대평지선	2012	995.41	0.94	0.94	0.98
	2013	821.62	0.75	0.79	0.94



(그림 3-10-17) 대평지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-18) 대평지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-19) 대평지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

다. 감곡지선

감곡지선 관개지구는 2012-2013년에 대해 적용하여 공급량을 모의한 후 실측치와 비교하여 평가하였다. <표 3-10-15>는 보정 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-16>은 통계적 변량을 이용하여 평가한 결과이다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 5.5 mm, 일 최대 관개량 12.9 mm, 물꼬높이 100.0 mm, 최소담수심 59.8 mm, 본답기 5월 12일 - 9월 22일, 이양기 4월 27일 - 5월 11일, 중간낙수기 7월 1일 - 7월 17일, 관개효율 28.5 %, 이양용수량 146.3 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 6.5 mm 일 최대 관개량 13.0 mm, 물꼬높이 52.6 mm, 최소담수심 52.4 mm, 본답기 4월 30일 - 9월 17일, 이양기 4월 30일 - 6월 30일, 중간낙수기 6월 4일 - 6월 4일, 관개효율 12.3 %, 이양용수량 179.5 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 478.23 mm/10days, R²는 0.96, NSE는 0.95, d는 0.99로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 384.91 mm/10days, R²는 0.77, NSE는 0.74, d는 0.94로 나타났다.

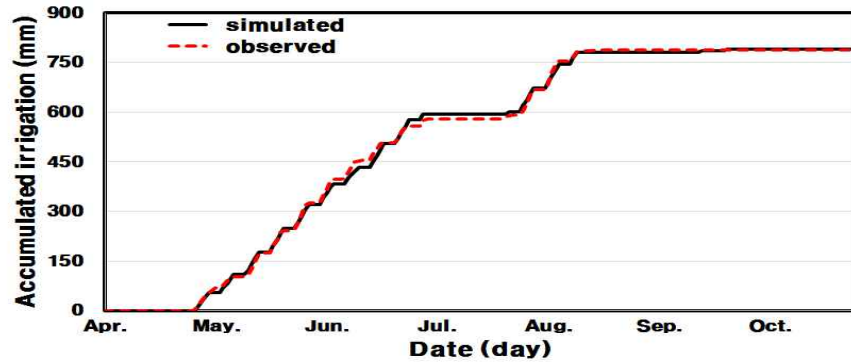
(그림 3-10-20)과 (그림 3-10-21)은 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-22)는 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 0.87로 나타났다.

<표 3-10-15> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (감곡지선)

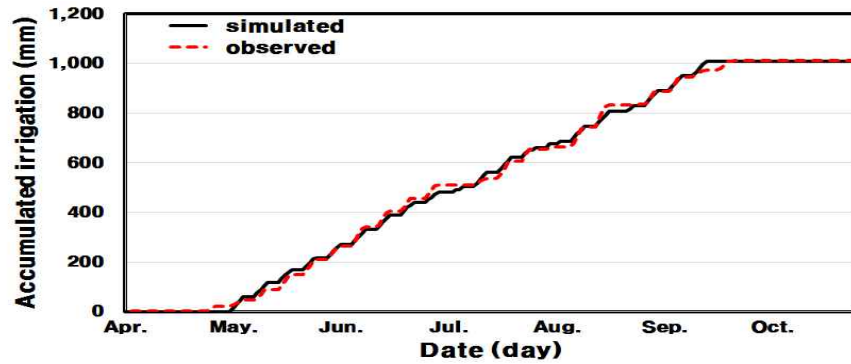
매개변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이양기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이양 용수량 (mm)
2012	5.5	12.9	100.0	59.8	5. 12 -9. 22	4. 27 -5. 11	7. 1 -7. 17	28.5	146.3
2013	6.5	13.0	52.6	52.4	4. 30 -9. 17	4. 30 -6. 30	6. 4 -6. 4	12.3	179.5

<표 3-10-16> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (감곡지선)

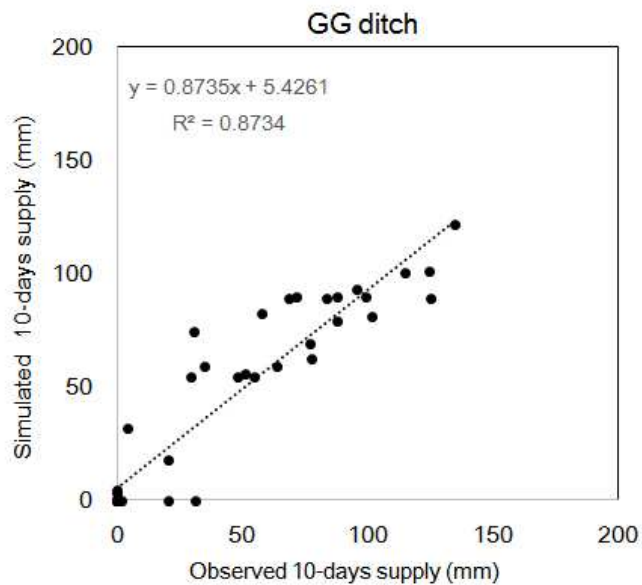
관개 지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
감곡 지선	2012	478.23	0.96	0.95	0.99
	2013	384.91	0.77	0.74	0.94



(그림 3-10-20) 감곡지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-21) 감곡지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-22) 감곡지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

라. 신용지선

신용지선 관개지구의 2012-2013년에 대해 적용하여 농업용수 공급량을 모의하고 실측치와 비교하여 평가하였다. <표 3-10-17>은 보정된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-18>은 통계적 변량을 이용하여 적용성을 평가한 결과를 나타낸다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 5.7 mm, 일 최대 관개량 19.6 mm, 물꼬높이 50.4 mm, 최소담수심 14.2 mm, 본답기 5월 6일 - 9월 22일, 이앙기 4월 16일 - 6월 15일, 중간낙수기 7월 5일 - 7월 11일, 관개효율 66.3 %, 이앙용수량 170.4 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 4.2 mm, 일 최대 관개량 29.7 mm, 물꼬높이 113.7 mm, 최소담수심 57.2 mm, 본답기 5월 1일 - 10월 1일, 이앙기 6월 21일 - 6월 30일, 중간낙수기 6월 11일 - 6월 13일, 관개효율 64.8 %, 이앙용수량 176.4 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 4194.22 mm/10days, R²는 0.86, NSE는 0.86, d는 0.96으로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 3644.09 mm/10days, R²는 0.60, NSE는 0.67, d는 0.89로 나타났다.

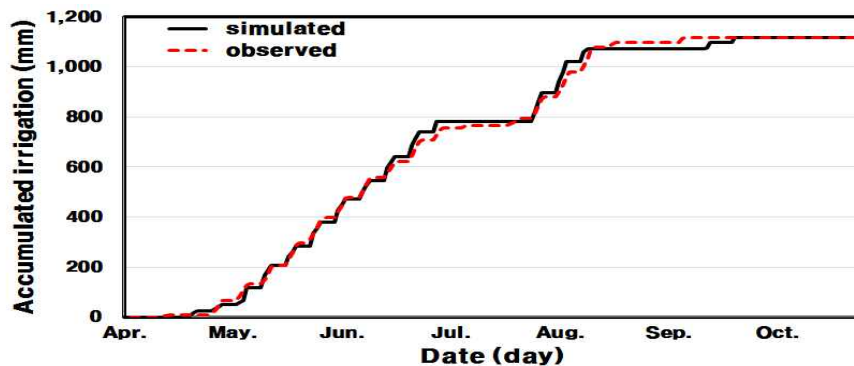
(그림 3-10-23)과 (그림 3-10-24)는 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-25)는 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 1.02로 나타났다.

<표 3-10-17> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (신용지선)

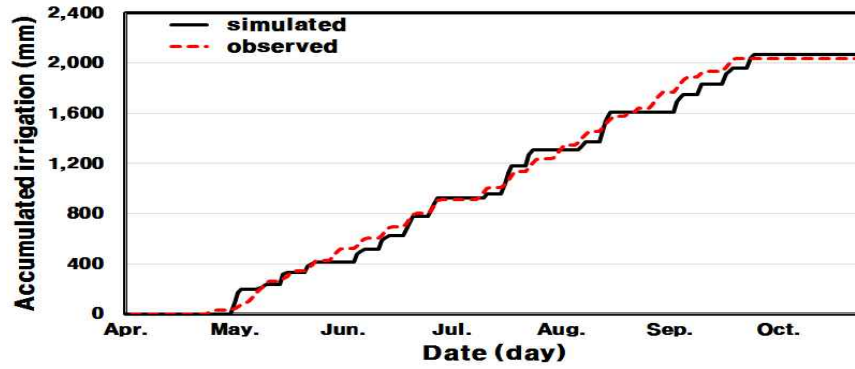
매개 변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이앙기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이앙 용수량 (mm)
2012	5.7	19.6	50.4	14.2	5. 6 -9. 22	4. 16 -6. 15	7. 5 -7. 11	66.3	170.4
2013	4.2	29.7	113.7	57.2	5. 1 -10. 1	6. 21 -6. 30	6. 11 -6. 13	64.8	176.4

<표 3-10-18> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (신용지선)

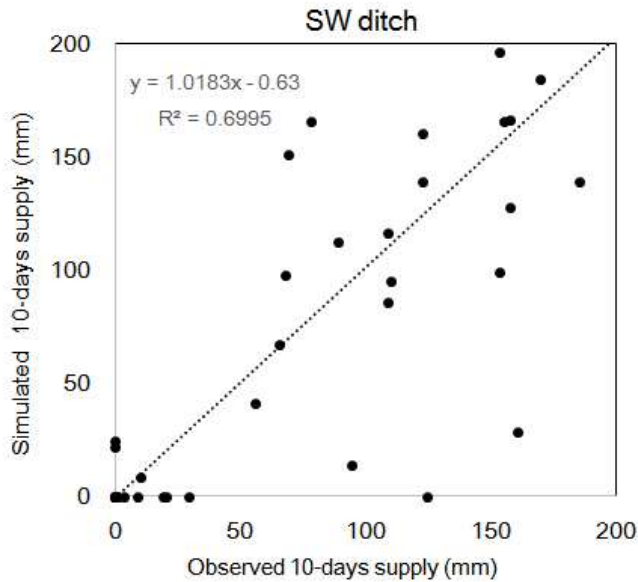
관개 지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
신용 지선	2012	4194.22	0.86	0.86	0.96
	2013	3644.09	0.60	0.67	0.89



(그림 3-10-23) 신용지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-24) 신용지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-25) 신용지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

마. 용성지선

용성지선 관개지구는 2012-2013년에 대해 적용하여 농업용수 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가하였다. <표 3-10-19>는 보정된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-20>은 통계적 변량을 이용하여 적용성을 평가한 결과를 나타낸다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 3.5 mm, 일 최대 관개량 13.1 mm, 물꼬높이 81.7 mm, 최소담수심 26.9 mm, 본답기 5월 28일 - 10월 24일, 이양기 5월 8일 - 5월 25일, 중간낙수기 6월 8일 - 6월 9일, 관개효율 47.4 %, 이양용수량 105.7 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 4.4 mm 일 최대 관개량 19.2 mm, 물꼬높이 40.9 mm, 최소담수심 20.8 mm, 본답기 5월 24일 - 10월 4일, 이양기 5월 11일 - 6월 12일, 중간낙수기 7월 2일 - 7월 12일, 관개효율 11.3 %, 이양용수량 153.4 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 1292.53 mm/10days, R^2 는 0.65, NSE는 0.52, d는 0.89로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 183.31 mm/10days, R^2 는 0.68, NSE는 0.75, d는 0.94로 나타났다.

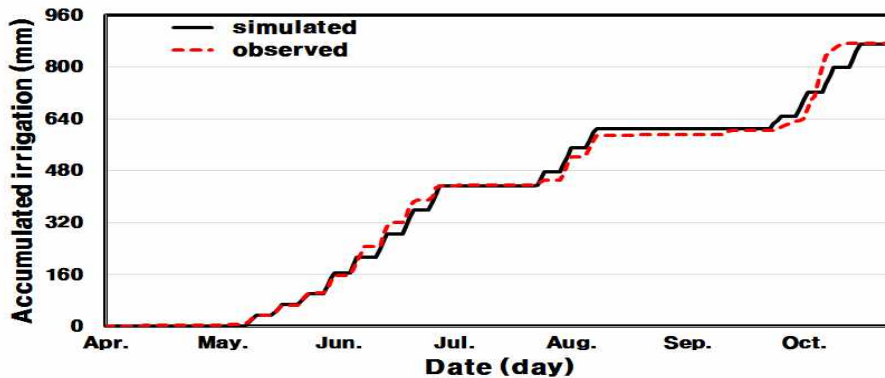
(그림 3-10-26)과 (그림 3-10-27)은 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-28)은 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 0.72로 나타났다.

<표 3-10-19> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (용성지선)

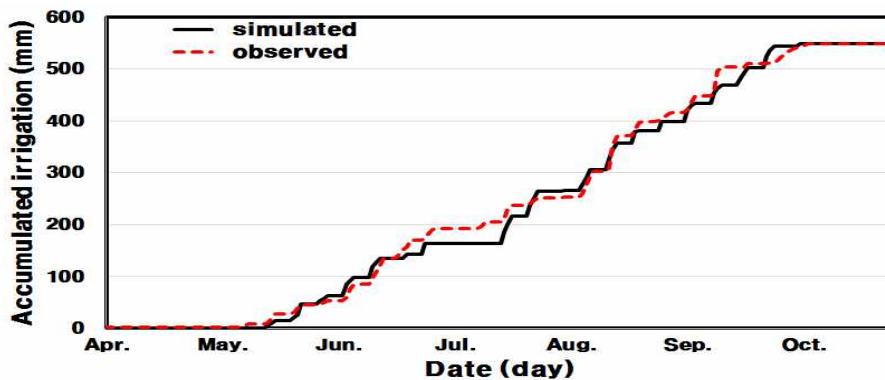
매개변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이랑기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이랑 용수량 (mm)
2012	3.5	13.1	81.7	26.9	5.28 -10.24	5.8 -5.25	6.8 -6.9	47.4	105.7
2013	4.4	19.2	40.9	20.8	5.24 -10.4	5.11 -6.12	7.2 -7.12	11.3	153.4

<표 3-10-20> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (용성지선)

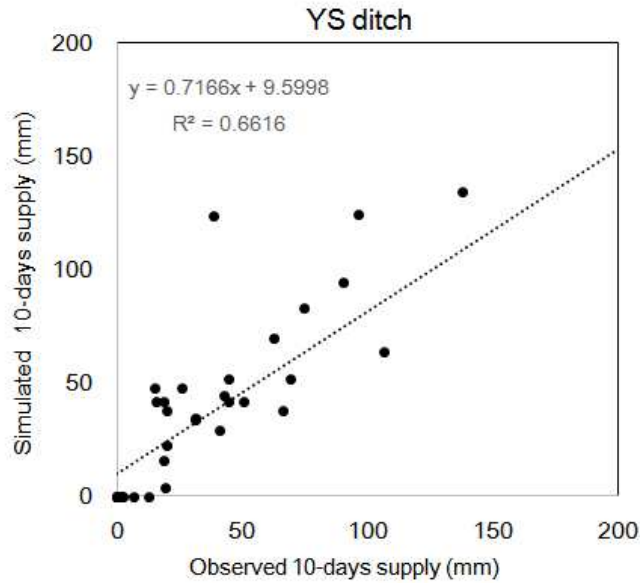
관개지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
용성지선	2012	1292.53	0.65	0.52	0.89
	2013	183.31	0.68	0.75	0.94



(그림 3-10-26) 용성지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-27) 용성지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-28) 용성지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

바. 종신지선

COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트를 종신지선 관개지구의 2012-2013년에 대해 적용하여 농업용수 공급량을 모의하고 실측치와 비교하여 평가하였다. <표 3-10-21>은 보정된 매개변수를 보여주고 있으며, <표 3-10-22>는 통계적 변량을 이용하여 적용성을 평가한 결과를 나타낸다.

보정 매개변수는 2012년의 경우 침투량 1.7 mm, 일 최대 관개량 21.4 mm, 물꼬높이 115.0 mm, 최소담수심 10.5 mm, 본답기 4월 19일 - 9월 24일, 이양기 6월 4일 - 6월 21일, 중간낙수기 6월 8일 - 6월 14일, 관개효율 28.0 %, 이양용수량 140.6 mm로 나타났다. 2013년의 경우 침투량 2.3 mm 일 최대 관개량 10.0 mm, 물꼬높이 60.2 mm, 최소담수심 24.3 mm, 본답기 5월 22일 - 9월 24일, 이양기 5월 30일 - 6월 2일, 중간낙수기 6월 28일 - 7월 20일, 관개효율 74.0 %, 이양용수량 192.4 mm 로 나타났다.

모형의 평가를 위한 통계적 변량은 2012년의 경우 RMSE는 2738.18 mm/10days, R²는 0.35, NSE는 0.21, d는 0.77로 나타났고, 2013년의 경우 RMSE는 2307.46 mm/10days, R²는 0.49, NSE는 0.60, d는 0.86으로 나타났다.

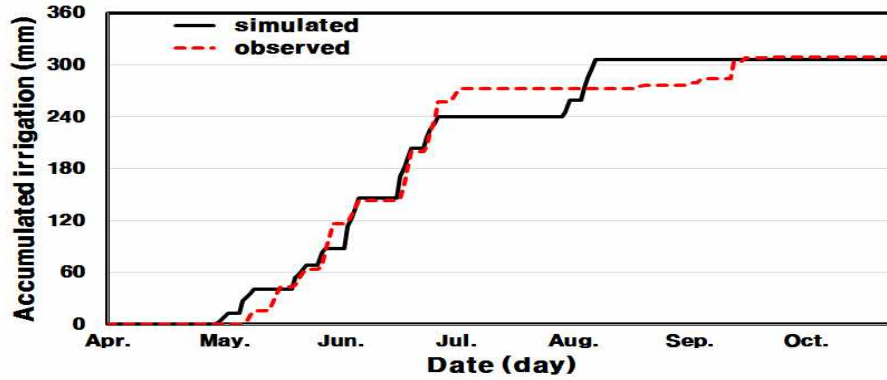
(그림 3-10-29)와 (그림 3-10-30)은 각각 2012년과 2013년의 누적 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 비교하여 보여주고 있다. 도식적 방법을 이용하여 농업용수 공급량 모의 결과를 평가해보면 모형의 모의 방식 및 보정된 매개변수는 실제 농업용수 공급량의 경향을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. (그림 3-10-31)은 순별 농업용수 공급량의 실측치와 모의치의 산포도를 보여주고 있다. 산포도의 기울기는 0.94로 나타났다.

<표 3-10-21> 농업용수 공급량 모형의 매개변수 보정치 (종신지선)

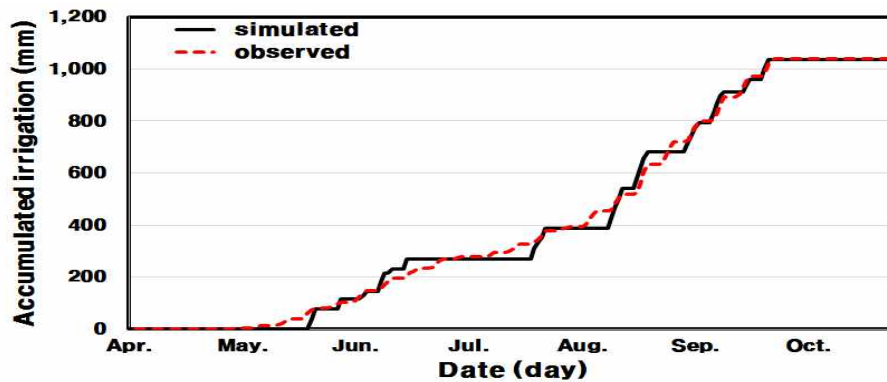
매개변수	침투량 (mm)	일 최대 관개량 (mm)	물꼬 높이 (mm)	최소 담수심 (mm)	본답기	이양기	중간 낙수기	관개 효율 (%)	이양 용수량 (mm)
2012	1.7	21.4	115.0	10.5	4. 19 -9. 24	6. 4 -6. 21	6. 8 -6. 14	28.0	140.6
2013	2.3	10.0	60.2	24.3	5. 22 -9. 24	5. 30 -6. 2	6. 28 -7. 20	74.0	192.4

<표 3-10-22> 보정 및 검정기간의 통계적 변량 (중신지선)

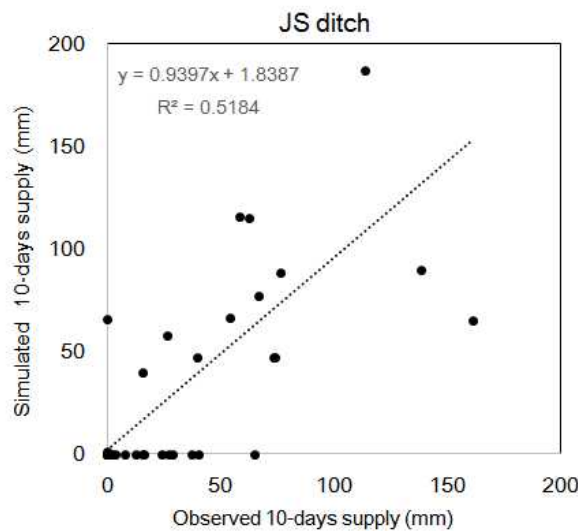
관개지구	기간	통계적 변량			
		RMSE (mm/10days)	R ²	NSE	d
중신지선	2012	2738.18	0.35	0.21	0.77
	2013	2307.46	0.49	0.60	0.86



(그림 3-10-29) 중신지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2012)



(그림 3-10-30) 중신지선의 누적 농업용수 공급량 실측치 및 모의치 비교 (2013)



(그림 3-10-31) 중신지선 농업용수 공급량 실측치 및 모의치의 산포도

4. 모형적용의 결과 분석 및 평가

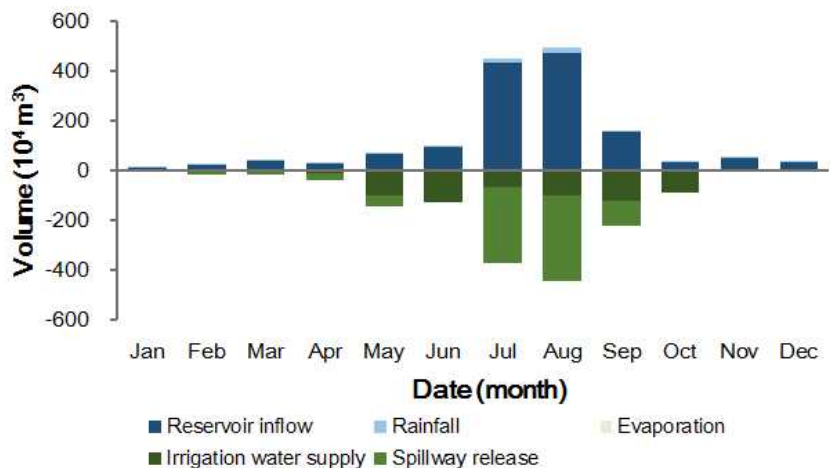
4.1. 저수지 유역 모형의 결과

가. 대화저수지

COMFARM의 저수지 물수지 컴포넌트를 이용하여 보정 및 검정기간인 2011-2012년에 대해 보정 매개변수를 적용하여 대화저수지의 물수지 요소를 모의하였다. (그림 3-10-32) 와 <표 3-10-23>은 모의기간의 월 평균 물수지 요소를 나타내고 있다. 저수지의 연 평균 유입량은 수면 강우량 76.2 만³m (5 %), 저수지 유입량 1,414.7 만³m (95 %)으로 나타났고, 연 평균 유출량은 수면 증발량 27.4 만³m (2 %), 농업용수 공급량 606.7 만³m (41 %), 물넘이 방류량 855.1 만³m (57 %)으로 나타났다. 농업용수 공급량은 5월-6월에 전체 공급량의 37 %인 224.3 만 m³으로 집중되는 것으로 나타났고, 9월에 20 %인 118.3 만³m으로 나타났다. 물넘이 방류량은 강우 집중시기인 7-8월에 전체의 76 %인 647.2 만³m으로 집중되는 것으로 나타났다. 수면강우량 및 수면증발량은 전체 물수지 요소에서 그 양이 미비한 것으로 판단된다.

<표 3-10-23> 대화저수지의 물수지 분석 결과

월별	유입 (10 ⁴ m ³)			유출 (10 ⁴ m ³)			
	수면 강우량	저수지 유입량	소계	수면 증발량	농업용수 공급량	물넘이 방류량	소계
1월	0.7	7.6	8.3	0.8	0.0	0.0	0.8
2월	1.7	21.2	22.9	1.1	0.0	16.6	17.7
3월	2.8	35.5	38.3	2.0	0.0	18.3	20.3
4월	3.6	24.0	27.6	3.1	10.7	24.2	37.9
5월	4.1	63.9	68.0	3.8	97.6	46.7	148.1
6월	4.7	90.9	95.5	3.3	126.6	0.0	129.9
7월	20.0	431.0	451.0	3.6	66.8	301.5	371.9
8월	22.6	470.7	493.3	3.4	99.5	345.7	448.5
9월	7.6	154.8	162.4	2.8	118.3	102.1	223.2
10월	2.2	33.2	35.3	1.8	87.1	0.0	88.9
11월	4.2	50.6	54.8	1.1	0.0	0.0	1.1
12월	2.0	31.4	33.4	0.7	0.0	0.0	0.7
합계	76.2	1,414.7	1,491.0	27.4	606.7	855.1	1,489.1



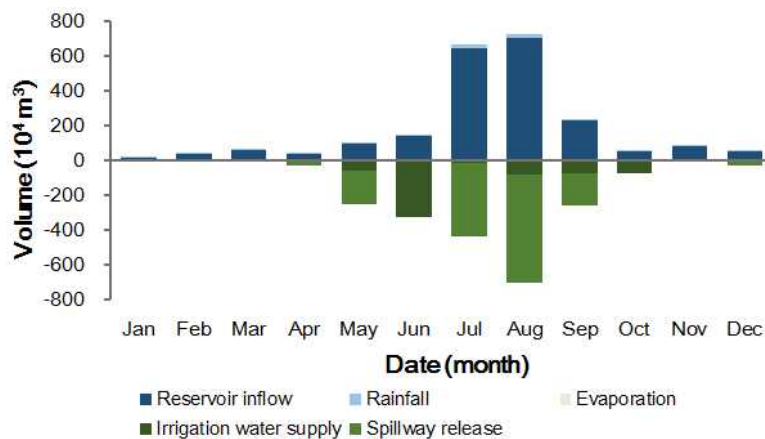
(그림 3-10-32) 대화저수지의 월별 물수지 분석 결과

나. 금평저수지

보정 및 검정기간인 2011-2012년에 대해 보정 매개변수를 적용하여 금평저수지의 물수지 요소를 모의하였다. (그림 3-10-33)과 <표 3-10-24>는 모의기간의 월 평균 물수지 요소를 나타내고 있다. 금평저수지의 연 평균 유입량은 수면 강우량 78.0 만m³ (4%), 저수지 유입량 2,112.4 만m³ (96%)으로 나타났고, 연 평균 유출량은 수면 증발량 29.9 만m³ (1%), 농업용수 공급량 618.9 만m³ (29%), 물넘이 방류량 1,481.0 만m³ (70%)으로 나타났다. 농업용수 공급량은 5월-6월에 전체 공급량의 61%인 377.5 만 m³으로 집중되는 것으로 나타났고, 8월에 13%인 79.1 만m³으로 나타났다. 물넘이 방류량은 강우 집중시기인 7-8월에 전체의 71%인 1,047.8 만m³으로 집중되는 것으로 나타났다. 수면강우량 및 수면증발량은 전체 물수지 요소에서 그 양이 미비한 것으로 판단된다.

<표 3-10-24> 금평저수지의 물수지 분석 결과

월별	유입 (10 ⁴ m ³)			유출 (10 ⁴ m ³)			
	수면 강우량	저수지 유입량	소계	수면 증발량	농업용수 공급량	물넘이 방류량	소계
1월	0.7	11.6	12.3	0.8	0.0	0.0	0.8
2월	1.8	31.7	33.5	1.1	0.0	0.0	1.1
3월	3.0	55.2	58.1	2.2	0.0	1.8	3.9
4월	3.1	37.3	40.3	3.3	0.0	30.6	33.9
5월	1.9	96.1	98.0	4.2	56.6	191.4	252.2
6월	5.1	137.0	142.0	3.8	320.9	0.0	324.7
7월	21.0	641.9	662.9	3.7	15.6	421.7	441.0
8월	25.0	699.5	724.5	3.6	79.1	626.1	708.8
9월	8.1	226.2	234.2	3.0	74.4	181.4	258.8
10월	2.6	49.8	52.4	2.0	72.3	0.0	74.3
11월	4.9	78.1	82.9	1.3	0.0	0.0	1.3
12월	1.0	48.3	49.2	0.8	0.0	28.0	28.8
합계	78.0	2,112.4	2,190.4	29.9	618.9	1,481.0	2129.8



(그림 3-10-33) 금평저수지의 월별 물수지 분석 결과

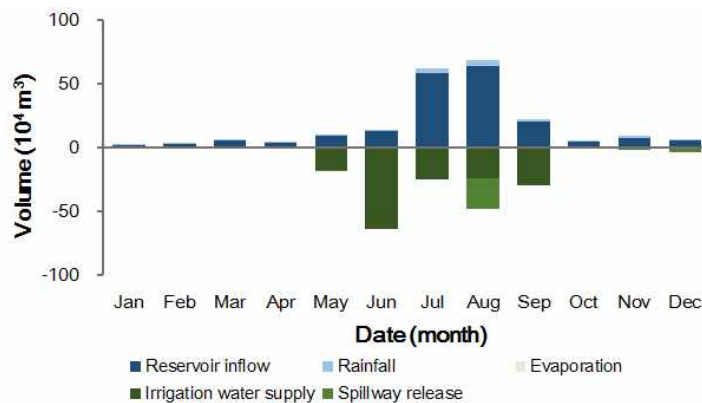
다. 당월저수지

당월저수지의 물수지 요소 또한 COMFARM의 저수지 물수지 컴포넌트를 이용하여

보정 및 검정기간인 2011-2012년에 대해 보정 매개변수를 적용하여 모의하였다. (그림 3-10-34)와 <표 3-10-25>는 모의기간의 월 평균 물수지 요소를 나타내고 있다. 당월 저수지의 연 평균 유입량은 수면 강우량 16.2 만m³ (8%), 저수지 유입량 194.1 만m³ (92%)으로 나타났고, 연 평균 유출량은 수면 증발량 6 만m³ (3.1%), 농업용수 공급량 157.7 만m³ (81%), 물넘이 방류량 30.8 만m³ (16%)으로 나타났다. 농업용수 공급량은 5월-6월에 전체 공급량의 51%인 80.3 만 m³으로 집중되는 것으로 나타났고, 9월에 19%인 29.4 만m³으로 나타났다. 물넘이 방류량은 강우 집중시기인 7-8월에 전체의 78%인 24 만m³으로 집중되는 것으로 나타났다. 수면강우량 및 수면증발량은 전체 물수지 요소에서 그 양이 미비한 것으로 판단된다.

<표 3-10-25> 당월저수지의 물수지 분석 결과

월별	유입 (10 ⁴ m ³)			유출 (10 ⁴ m ³)			
	수면 강우량	저수지 유입량	소계	수면 증발량	농업용수 공급량	물넘이 방류량	소계
1월	0.1	1.3	1.4	0.2	0.0	0.0	0.2
2월	0.4	2.8	3.2	0.2	0.0	0.0	0.2
3월	0.6	5.5	6.1	0.4	0.0	0.0	0.4
4월	0.8	3.8	4.6	0.7	0.0	0.0	0.7
5월	1.0	9.1	10.0	0.9	17.2	0.9	19.0
6월	0.9	12.7	13.6	0.7	63.2	0.0	63.9
7월	3.9	58.2	62.1	0.7	24.3	0.0	25.0
8월	4.9	63.6	68.5	0.7	23.7	24.0	48.4
9월	1.6	20.0	21.6	0.6	29.4	0.0	30.0
10월	0.6	4.7	5.3	0.4	0.0	0.2	0.6
11월	1.0	7.6	8.6	0.3	0.0	2.1	2.4
12월	0.5	5.0	5.5	0.2	0.0	3.5	3.7
합계	16.2	194.1	210.4	6.0	157.7	30.8	194.5



(그림 3-10-34) 당월저수지의 월별 물수지 분석 결과

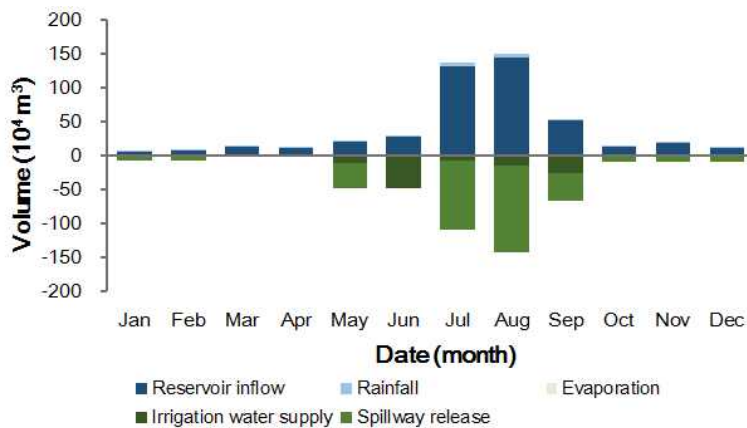
라. 선암저수지

보정 및 검정기간인 2011-2012년에 대해 보정 매개변수를 적용하여 선암저수지의 물수지 요소를 모의하였다. (그림 3-10-35)와 <표 3-10-26>은 모의기간의 월 평균 물수지 요소를 나타내고 있다. 선암저수지의 연 평균 유입량은 수면 강우량 17.4 만m³ (4

%), 저수지 유입량 449.7 만m³ (96 %)으로 나타났고, 연 평균 유출량은 수면 증발량 7.1 만m³ (2 %), 농업용수 공급량 103.9 만m³ (22 %), 물넘이 방류량 355.7 만m³ (76 %)으로 나타났다. 농업용수 공급량은 5월-6월에 전체 공급량의 56 %인 58.2 만 m³으로 집중되는 것으로 나타났고, 9월에 24 %인 24.9 만m³으로 나타났다. 물넘이 방류량은 강우 집중시기인 7-8월에 전체의 65 %인 231.8 만m³으로 집중되는 것으로 나타났다. 수면강우량 및 수면증발량은 전체 물수지 요소에서 그 양이 미비한 것으로 판단된다.

<표 3-10-26> 선암저수지의 물수지 분석 결과

월별	유입 (10 ⁴ m ³)			유출 (10 ⁴ m ³)			
	수면 강우량	저수지 유입량	소계	수면 증발량	농업용수 공급량	물넘이 방류량	소계
1월	0.2	4.6	4.7	0.2	0.0	7.3	7.5
2월	0.4	6.9	7.3	0.3	0.0	7.0	7.3
3월	0.6	11.8	12.4	0.5	0.0	1.6	2.1
4월	0.8	9.8	10.6	0.8	0.0	1.6	2.4
5월	0.6	20.1	20.7	1.0	10.1	38.0	49.1
6월	0.9	27.1	28.0	0.8	48.1	0.0	48.9
7월	4.6	131.2	135.8	0.9	6.4	103.2	110.5
8월	5.4	143.9	149.3	0.9	14.3	128.6	143.8
9월	1.7	51.3	53.1	0.7	24.9	40.6	66.2
10월	0.6	13.4	13.9	0.5	0.0	9.2	9.7
11월	1.1	18.1	19.2	0.3	0.0	10.0	10.3
12월	0.5	11.5	12.0	0.2	0.0	8.7	8.9
합계	17.4	449.7	467.1	7.1	103.9	355.7	466.7



(그림 3-10-35) 선암저수지의 월별 물수지 분석 결과

4.2. 농업용수 공급량 모형의 결과

가. 화호지선

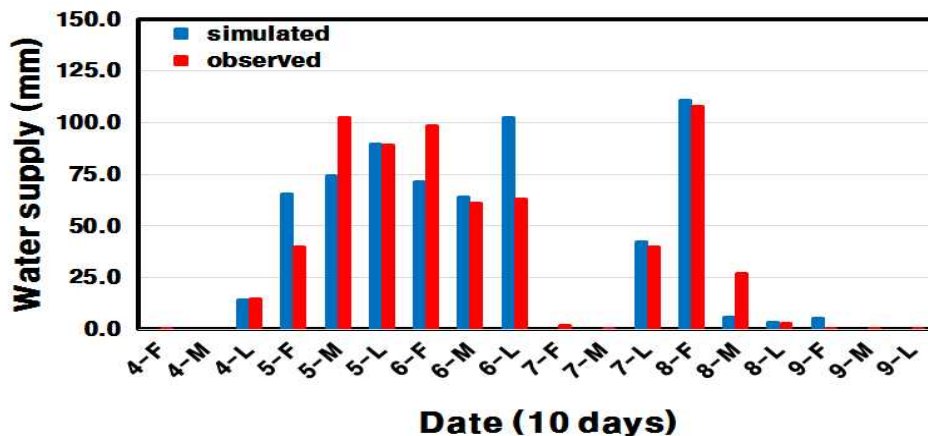
본 연구에서는 COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트를 화호지선에 적용하여 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가하였다. 농업용수 공급량의 모의치와 실측치를 비교하여 보여주고 있다. (그림 3-10-36)과 (그림 3-10-37)은 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표

3-10-27>은 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다.

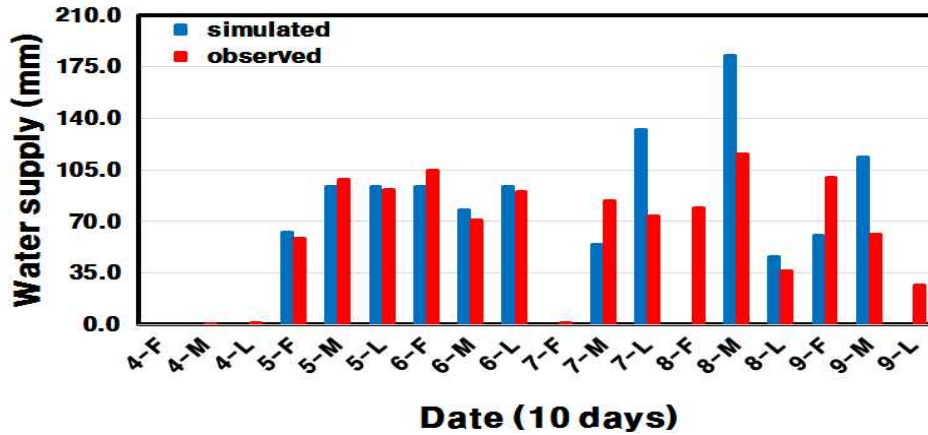
<표 3-10-27> 화호지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

월별		모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)
2012	4월	14.9	14.3
	5월	231.4	229.6
	6월	223.1	237.8
	7월	42.5	42.3
	8월	138.0	120.1
	9월	0.1	5.2
	합계	649.9	649.4
2013	4월	1.4	0.0
	5월	249.3	249.5
	6월	266.4	265.1
	7월	159.0	186.9
	8월	231.2	228.5
	9월	187.9	174.2
	합계	1,095.0	1,104.1

2012년의 모의 총 공급량은 649.9 mm, 실측 총 공급량은 649.4 mm로 나타났으며, 2013년의 경우 모의 총 공급량은 1095.0 mm, 실측 총 공급량은 1,104.1 mm로 나타났다. 모의 공급량은 2012년의 경우 5월 231.4 mm, 6월 229.6 mm, 2013년의 경우 5월 249.3 mm, 6월 266.5 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 229.6 mm, 6월 237.8 mm, 2013년의 경우 5월 249.5 mm, 6월 265.1 mm로 나타났다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 42.3 mm, 모의치는 42.5 mm로 2013년의 경우 실측치 186.9 mm, 모의치 159.0 mm가 공급되는 것으로 나타났다.



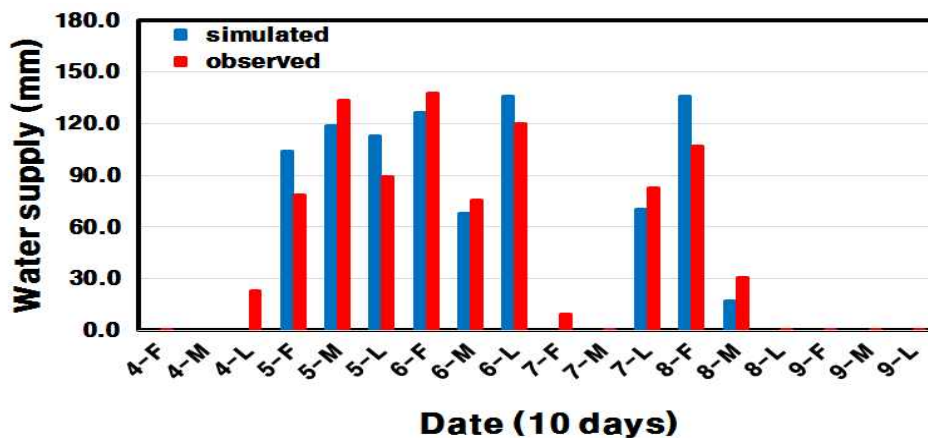
(그림 3-10-36) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (화호지선, 2012)



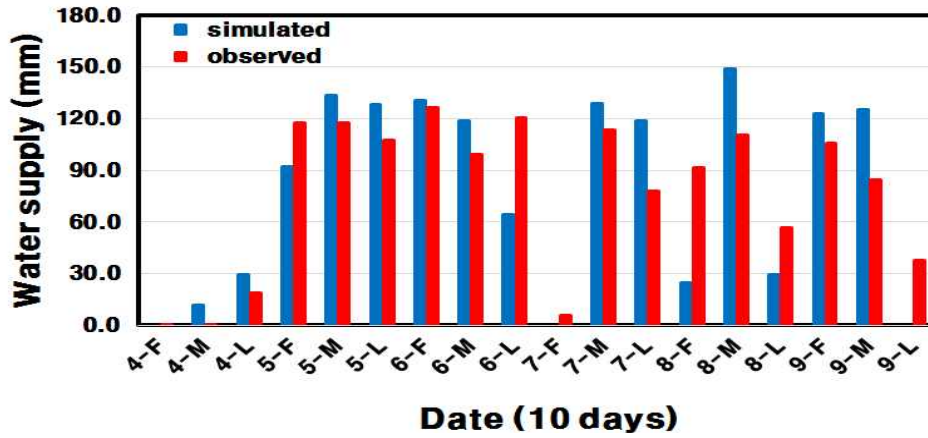
(그림 3-10-37) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (화호지선, 2013)

나. 대평지선

다음으로, 대평지선에 적용하여 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가하였다. 농업용수 공급량의 모의치와 실측치를 비교하여 보여주고 있다. (그림 3-10-38)과 (그림 3-10-39)는 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표 3-10-28>은 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다. 2012년의 모의 총 공급량은 888.4 mm, 실측 총 공급량은 888.8 mm로 나타났다. 2013년의 경우 모의 총 공급량은 1,391.9 mm, 실측 총 공급량은 1,406.9 mm로 나타났다. 모의 공급량은 2012년의 경우 5월 301.2 mm, 6월 333.3 mm, 2013년의 경우 5월 342.9 mm, 6월 346.4 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 335.5 mm, 6월 329.9 mm, 2013년의 경우 5월 353.2 mm, 6월 313.9 mm로 나타났다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 70.6 mm, 모의치는 92.5 mm로 2013년의 경우 실측치 247.6 mm, 모의치 197.0 mm가 공급되는 것으로 나타났다.



(그림 3-10-38) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (대평지선, 2012)



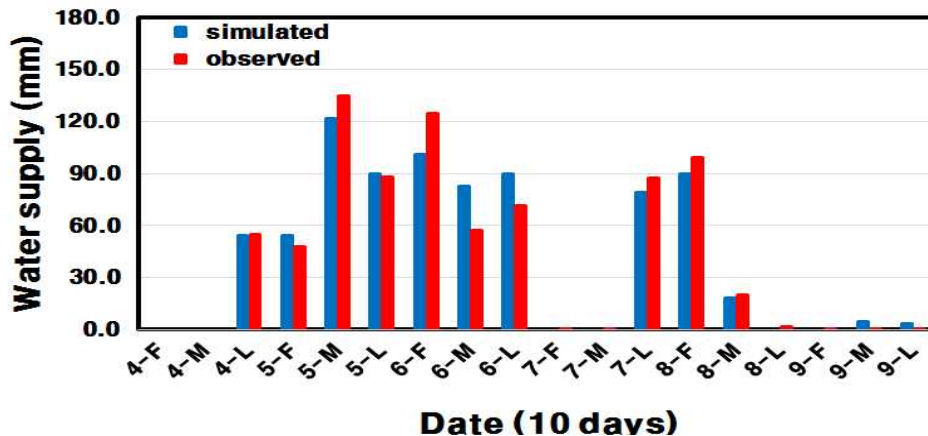
(그림 3-10-39) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (대평지선, 2013)

<표 3-10-28> 대평지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

월별	모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)	
2012	4월	22.8	0.0
	5월	301.2	335.5
	6월	333.3	329.9
	7월	92.5	70.6
	8월	138.1	152.9
	9월	0.6	0.0
	합계	888.4	888.8
2013	4월	19.2	41.2
	5월	342.9	353.2
	6월	346.4	313.9
	7월	197.0	247.6
	8월	258.8	203.0
	9월	227.5	248.0
	합계	1,391.9	1,406.9

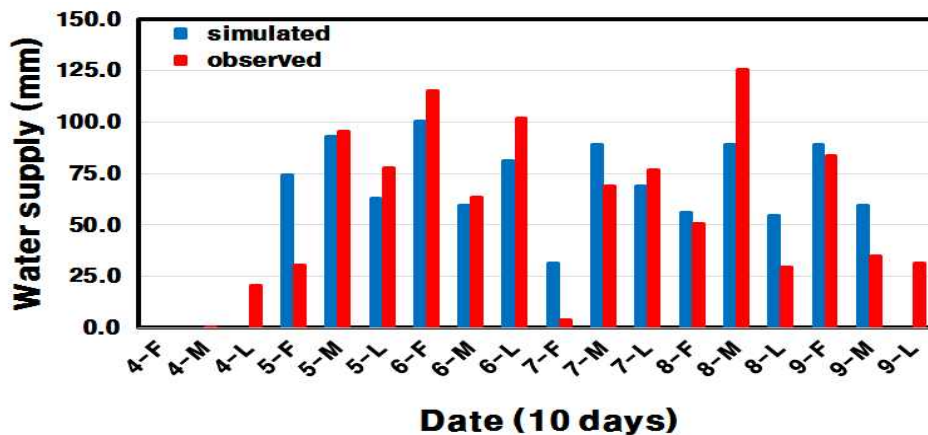
다. 감곡지선

감곡지선에 적용하여 공급량을 모의하고 실측치와 비교하여 평가한 결과 (그림 3-10-40) 과 (그림 3-10-41)은 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표 3-10-29>는 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다.



(그림 3-10-40) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (감곡지선, 2012)

2012년의 모의 총 공급량은 788.8 mm, 실측 총 공급량은 789.6 mm로 나타났으며, 2013년의 경우 모의 총 공급량은 1,009.8 mm, 실측 총 공급량은 1,009.5 mm로 나타났습니다. 모의 공급량은 2012년의 경우 5월 270.7 mm, 6월 253.9 mm, 2013년의 경우 5월 203.9 mm, 6월 280.5 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 266.3 mm, 6월 273.6 mm, 2013년의 경우 5월 230.3 mm, 6월 241.1 mm로 나타났습니다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났습니다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 79.2 mm, 모의치는 87.9 mm로 2013년의 경우 실측치 189.7 mm, 모의치 149.5 mm가 공급되는 것으로 나타났습니다. COMFARM은 실제 현장에서 운영되는 중간낙수기에 용수 공급을 중단하는 기작을 잘 반영하는 것으로 나타났습니다.



(그림 3-10-41) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (감곡지선, 2013)

<표 3-10-29> 감곡지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

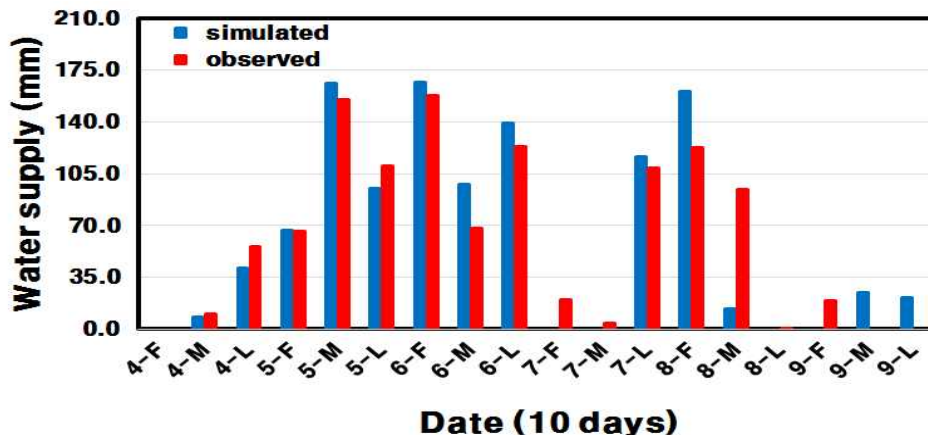
월별	모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)	
2012	4월	54.8	54.5
	5월	270.7	266.3
	6월	253.9	273.6
	7월	87.9	79.2
	8월	121.2	108.0
	9월	0.3	8.0
	합계	788.8	789.6
2013	4월	20.6	0.0
	5월	203.9	230.3
	6월	280.5	241.1
	7월	149.5	189.7
	8월	205.6	199.6
	9월	149.7	148.8
	합계	1,009.8	1,009.5

라. 신용지선

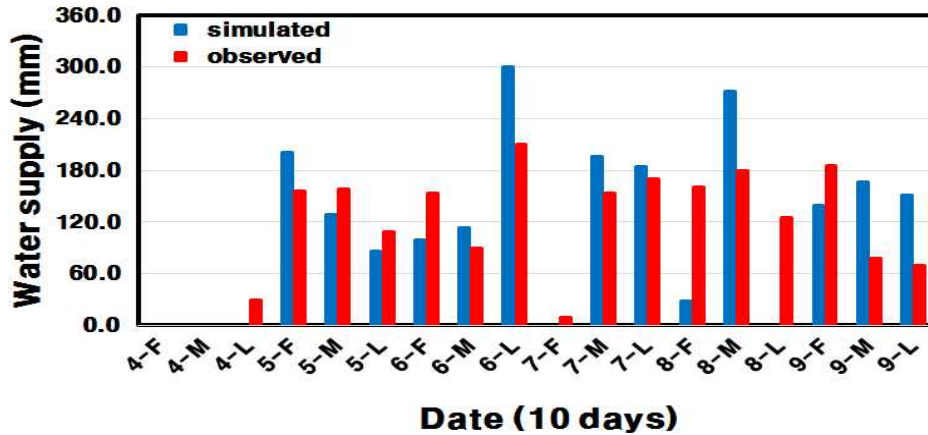
신용지선의 공급량 모의 및 실측치 비교평과 결과는 (그림 3-10-42)와 (그림 3-10-43)에서 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표 3-10-30>은 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다. 2012년의 모의 총 공급량은 1,117.2 mm, 실측 총 공급량은 1,118.4 mm로 나타났으며, 2013년의 경우 모의 총 공급량은 2,034.8 mm, 실측 총 공급량은 2,064.7 mm로 나타났다. 모의 공급량은 2012년의 경우 5월 331.4 mm, 6월 349.1 mm, 2013년의 경우 5월 422.2 mm, 6월 452.5 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 328.2 mm, 6월 403.1 mm, 2013년의 경우 5월 414.4 mm, 6월 512.3 mm로 나타났다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 116.5 mm, 모의치는 133.2 mm로 2013년의 경우 실측치 380.8 mm, 모의치 332.1 mm가 공급되는 것으로 나타났다.

<표 3-10-30> 신용지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

월별		모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)
2012	4월	65.8	49.7
	5월	331.4	328.2
	6월	349.1	403.1
	7월	133.2	116.5
	8월	218.1	174.4
	9월	19.5	46.4
	합계	1,117.2	1,118.4
2013	4월	29.6	0.0
	5월	422.2	414.4
	6월	452.5	512.3
	7월	332.1	380.8
	8월	464.9	300.6
	9월	333.5	456.7
	합계	2,034.8	2,064.7



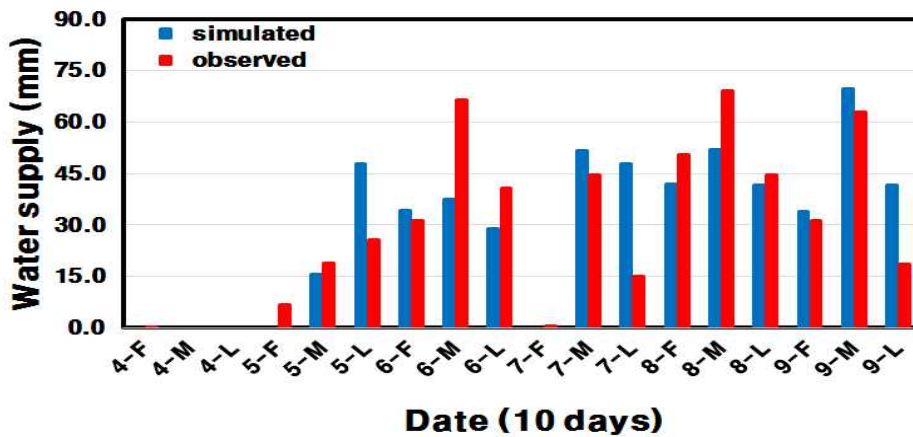
(그림 3-10-42) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (신용지선, 2012)



(그림 3-10-43) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (신용지선, 2013)

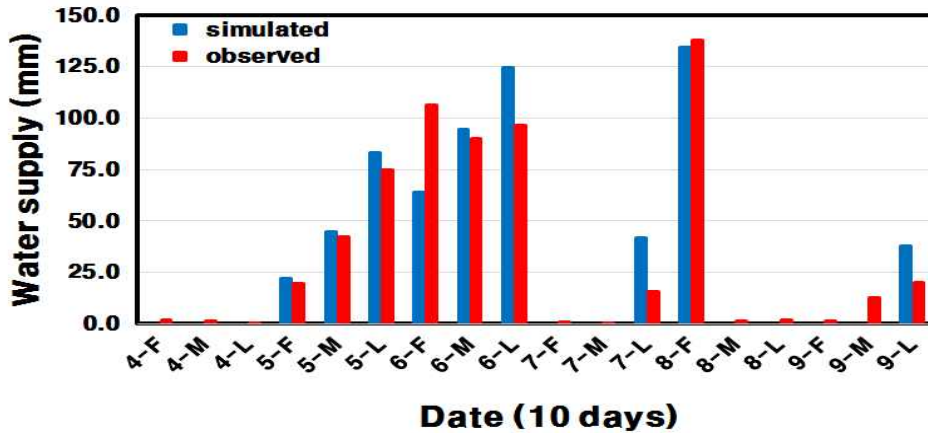
마. 용성지선

용성지선의 공급량 모의 및 실측치 비교평과 결과는 (그림 3-10-44)와 (그림 3-10-45)에서 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표 3-10-31>은 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다. 2012년의 모의 총 공급량은 624.8 mm, 실측 총 공급량은 647.7 mm로 나타났으며, 2013년의 경우 모의 총 공급량은 526.7 mm, 실측 총 공급량은 544.5 mm로 나타났다.



(그림 3-10-44) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (용성지선, 2012)

모의 공급량은 2012년의 경우 5월 137.3 mm, 6월 292.8 mm, 2013년의 경우 5월 51.2 mm, 6월 138.5 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 150.4 mm, 6월 283.1 mm, 2013년의 경우 5월 63.6 mm, 6월 100.9 mm로 나타났다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 42.0 mm, 모의치는 16.5 mm로 2013년의 경우 실측치 99.5 mm, 모의치 60.1 mm가 공급되는 것으로 나타났다.



(그림 3-10-45) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (용성지선, 2013)

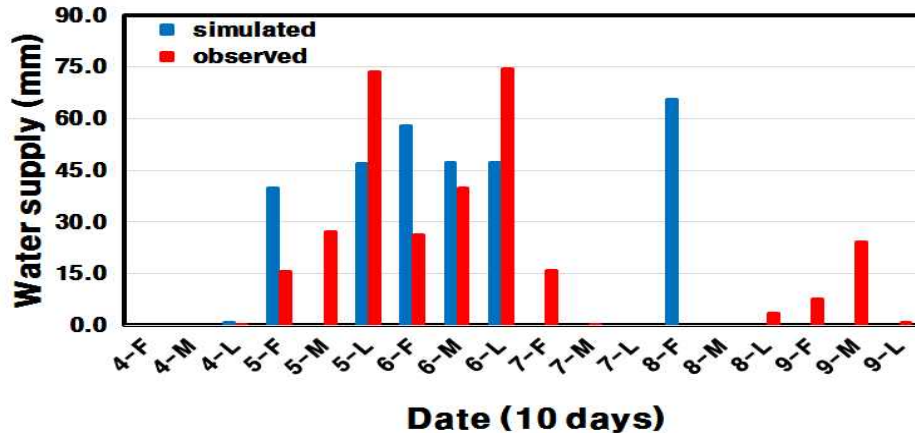
<표 3-10-31> 용성지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

월별		모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)
2012	4월	3.0	0.0
	5월	137.3	150.4
	6월	292.8	283.1
	7월	16.5	42.0
	8월	141.3	134.5
	9월	34.0	37.6
	합계	624.8	647.7
2013	4월	0.0	0.0
	5월	51.2	63.6
	6월	138.5	100.9
	7월	60.1	99.5
	8월	164.1	135.3
	9월	112.8	145.3
	합계	526.7	544.5

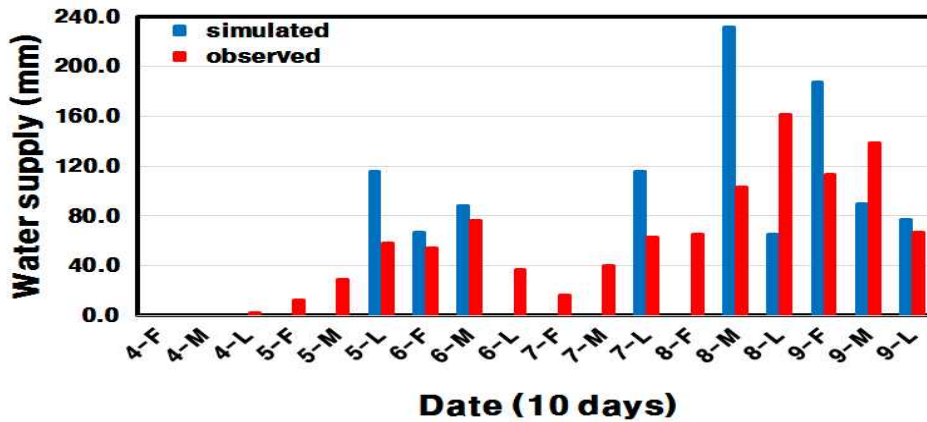
바. 종신지선

마지막으로, COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트를 종신지선에 적용하여 공급량을 모의하였고 실측치와 비교하여 평가하였다. 농업용수 공급량의 모의치와 실측치를 비교하여 보여주고 있다. (그림 3-10-46)과 (그림 3-10-47)은 각각 2012년과 2013년의 농업용수 공급량의 실측치와 모의치를 순별로 비교하여 보여주고 있으며, <표 3-10-32>는 월별 공급량을 비교하여 보여주고 있다. 2012년의 모의 총 공급량은 308.7 mm, 실측 총 공급량은 305.7 mm로 나타났으며, 2013년의 경우 모의 총 공급량은 1,038.3 mm, 실측 총 공급량은 1,037.3 mm로 나타났다. 모의 공급량은 2012년의 경우 5월 116.5 mm, 6월 140.3 mm, 2013년의 경우 5월 100.0 mm, 6월 168.1 mm로 나타났으며, 실측 공급량은 2012년의 경우 5월 86.7 mm, 6월 152.4 mm, 2013년의 경우 5월 115.7 mm, 6월 155.1 mm로 나타났다. 농업용수 공급량의 모의치는 실측치와 유사한 것으로 판단되며 영농초기에 농업용수가 많이 공급되는 특징을 잘 반영하는 것으로

나타났다. 7월에는 중간낙수가 실시되어 용수 공급이 중단되는 시기가 포함되며 2012년의 경우 실측치는 0.0 mm, 모의치는 15.8 mm로 2013년의 경우 실측치 115.4 mm, 모의치 119.3 mm가 공급되는 것으로 나타났다.



(그림 3-10-46) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (중신지선, 2012)



(그림 3-10-47) 순별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교 (중신지선, 2013)

<표 3-10-32> 중신지선의 월별 농업용수 공급량 모의치 및 실측치 비교

월별		모의 농업용수 공급량 (mm)	실측 농업용수 공급량 (mm)
2012	4월	0.1	0.9
	5월	116.5	86.7
	6월	140.3	152.4
	7월	15.8	0.0
	8월	3.4	65.7
	9월	32.7	0.0
	합계	308.7	305.7
2013	4월	2.6	0.0
	5월	100.0	115.7
	6월	168.1	155.1
	7월	119.3	115.4
	8월	329.7	296.8
	9월	318.6	354.4
	합계	1,038.3	1,037.3

5. COMFARM의 모의능력 평가

본 연구에서는 개발된 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 종합해석 Framework인 COMFARM (COmponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)을 이용하여 동진용수관리지구의 저수지 유역을 대상으로 저수지 물수지 성분을 모의하였고, 급수지구를 대상으로 농업용수 공급량을 모의하였다. 모의 요소는 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 모니터링하는 실측 자료를 이용하여 통계적 방법과 도식적 방법을 통해 비교·평가하였다. COMFARM을 이용하여 동진용수관리지구에 적용한 결과, 기존에 널리 사용되던 HOMWRS (Hydrological Operation Model for Water Resources System) 모형과 비교하여 HOMWRS 모형에서 고려하지 못 하는 몇 가지 문제점이 개선되었다.

저수지 물수지 성분 중 저수지 유입량은 HOMWRS 모형의 경우 수정 3단 Tank 모형과 김현영 (1988)에 의해 개발된 매개변수 추정 회귀식을 이용하고 있다. COMFARM의 경우 김현영식과 서울대학교에서 자체개발한 매개변수 추정 회귀식을 선택 이용하도록 구성되어 있다. 기저유량이 중요한 영향을 미치는 지역의 경우 김현영식을 이용하고 침투유량이 중요한 영향을 미치는 지역의 경우 서울대학교 개발식을 이용하는 것을 추천한다. 본 연구에서는 김현영식을 이용하여 저수지 유입량을 모의하였으며 대화, 금평, 당월, 선암 저수지에 대한 모의 결과의 일부 구간을 제외하고는 실측치와 모의치의 저수지 수위 상승이 잘 일치하는 것으로 나타나 COMFARM의 저수지 유입량 모의는 적절히 이루어진 것으로 판단된다.

저수지 물수지 해석 컴포넌트에서의 농업용수 공급량 모의 능력 평가는 영농기 (4월-9월)의 실측 저수지 수위의 내려가는 경향과 모의 수위가 내려가는 경향이 잘 일치하는지를 통계적/도식적으로 확인하여 평가할 수 있다. 공급량 관련 매개변수인 관개효율, 침투량, 최소담수심, 물꼬 높이에 따라 공급량은 민감하게 반응하는 것으로 나타나는 것으로 보고되고 있으며, 적절한 매개변수를 이용하지 않으면 실제 저수지 수위 결과와 전혀 다른 모의 결과가 도출될 수 있는 것으로 보고하고 있다. 이로 미루어보아 본 연구 대상지인 대화, 금평, 당월, 선암 저수지에 대한 보정 매개변수에 따른 모의 공급량은 통계적/도식적 평가한 결과 실제 방류기작을 반영하여 모의가 잘 이루어진 것으로 판단된다.

COMFARM은 HOMWRS모형에서는 모의하지 못 하는 제한수위 운영기작은 고려할 수 있으며, 이에 따른 제한수위 운영에 따른 방류량을 모의할 수 있다. 우리나라에서는 농업용수 공급을 위한 단일 목적에서 최근에 홍수조절의 목적이 추가되었다. 농업생산 기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 수위조절장치(수문)가 있는 저수지에 대하여 용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 제한수위를 설정하여 운영하도록 규정되어 있다. 제한수위의 설정은 기존의 만수위보다 낮은 저수지 수위를 유지함에 따라 저수지 하류 하천으로 방류되는 수량이 증가할 수 있다. 따라서 기존의 DIROM 및 HOMWRS에서 저수지 물수지를 모의하기 위해 개발된 과거의 규칙에서 현재의 여건을 고려한 새로운 운영 규칙을 개발한 모형으로 대체될 필요가 있으며, COMFARM은 이를 반영하고 있다.

COMFARM은 농업용수 공급량 모의와 관련하여 기존에 이용하는 방식에서 못자리

용수량을 제외하고, 중간낙수시기를 고려하여 모의한다. COMFARM에서 못자리 용수량을 제외한 이유는 전체 공급량 모의에 있어 못자리 용수량은 미비한 양을 차지하고, 또한 실제 현장의 농민들은 공장에서 대량 생산된 모를 이용하는 추세를 반영하였기 때문이다. 중간낙수시기에 공급량이 모의가 안 되어 실제 경향을 잘 반영하여 모의가 되는 것을 확인할 수 있다. HOMWRS 등의 기존 모형에서는 이 시기에 공급량 모의가 중단되는 기작이 반영이 되지 않아 증발산량, 침투량, 관개효율에 따라 공급량이 모의가 이루어진다. 하지만 더 중요한 요소는 앞서 기술한 바와 같이 공급량 모의에 있어서 관개효율, 일 최대 공급량, 최소담수심, 물꼬 높이 등과 같은 매개변수가 적절한 값을 선택하여 모의가 이루어졌는지를 판단하는 것이다. 본 연구의 결과는 동진지구 지선 공급량의 모의가 잘 이루어진 것으로 통계적/도식적 평가되었다.

본 연구에서는 양수장 저수지의 저수지 물수지 성분에 대한 모의를 실시하지 않았다. 이는 양수장 저수지의 경우 저수지 유입량 성분이 상류유역의 유출량 뿐만 아니라 양수장에서 펌프하여 유입되는 양이 필요하나 이에 대한 실측치를 구하지 못 하였기 때문이다. 양수장에서 펌프하는 양은 전력시간 등의 자료를 이용하여 산정할 수도 있으나 본 연구에서는 이에 관한 자료를 수집하기에 어려움이 있었다. 임상준 등 (2000)은 양수장 공급량에 관한 모의 기법을 제시하였으며 이를 통해서도 유입량 성분을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 양수장 저수지의 수위가 확보된 경우 저수지 수위를 통해 양수장 펌프 양 및 저수지 유입량을 역으로 추정하는 방법이 필요할 것으로 보인다.

6. COMFARM의 사용자 편의성 개선사항 분석

농촌용수의 종합적인 해석을 위한 개발한 COMFARM은 기존의 HOMWRS모형이 가지고 있는 시스템적인 한계를 개선하여 모형을 모의함에 있어 사용자 편의성을 극대화하였다. HOMWRS에 내재한 시스템적인 개선사항은 총 6가지로 정리할 수 있으며, <표 3-10-33>에 정리하였다.

<표 3-10-33> HOMWRS 모형의 시스템적인 개선사항

ID	개선되어야 할 사항
1	기상청 제원 입력 불가하여 국외 자료 등의 적용 한계가 있음
2	논 및 밭의 필요수량 산정 시 기본으로 설정된 값을 수정 후 재구동시 수정된 값을 저장하지 못하고 다시 초기화 됨
3	오류 발생 시 프로그램이 로그를 남기지 않고 강제 종료
4	일별 출력 자료에 단위가 기재되지 않음
5	출력 자료를 시각적 (그래프 등)으로 확인할 수 없음
6	증발산량 산정에 있어서 Modified Penman 식만 사용함

(그림 3-10-48) - (그림 3-10-53)은 HOMWRS의 시스템적인 한계점을 나타내는 구동화면과 이를 개선하여 반영한 COMFARM을 구동화면을 비교하여 나타내고 있다. (그림 3-10-48)은 기상청의 제원이 정해져 있어 추가적인 기상자료를 입력하지 못하는 점을 개선한 화면이다. HOMWRS에서 정해진 기상 관측소를 선택하여 기상 자료를 입력하는 방법 외에 추가로 COMFARM에서는 사용자 정의 기상 자료를 입력할 수 있도록 개선하였다.

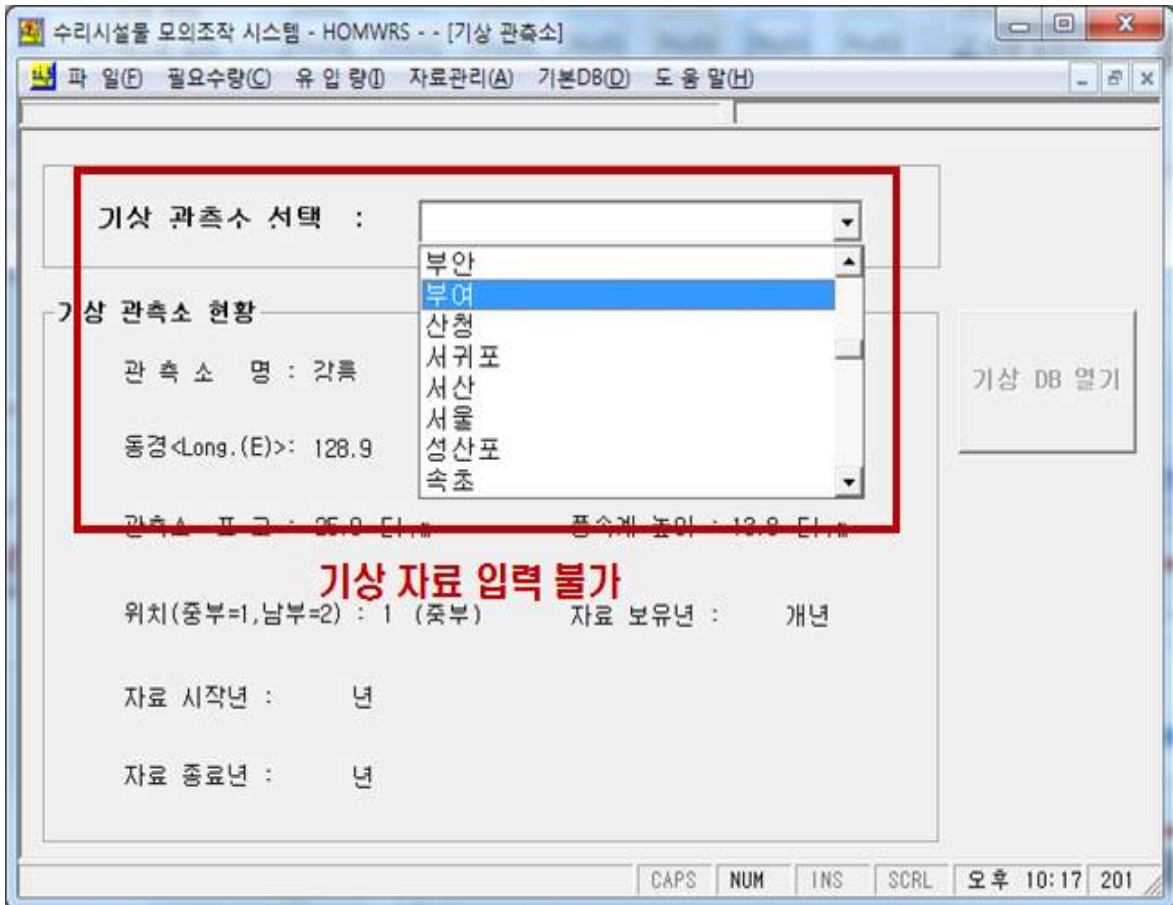
(그림 3-10-49)는 논 및 바의 필요수량 산정 시에 입력 자료를 수정 후 저장하지 못하는 점을 개선한 화면이다. HOMWRS에서는 입력 자료를 수정하여도 다시 초기화 되는 점을 COMFARM에서는 'Save' 버튼을 이용하여 수시로 저장할 수 있도록 개선하였다.

(그림 3-10-50)은 프로그램 오류 발생 시에 로그를 남기지 않고 강제 종료하는 점을 개선한 화면이다. HOMWRS는 소스 상의 오류로 인해 강제로 종료되는 경우가 종종 발생하였지만, COMFARM은 소스 상의 오류를 수정하여 프로그램의 안정성을 제고하였다. 추가로 오류가 발생하여도 로그를 기록하여 추후 확인할 수 있도록 구현하였다.

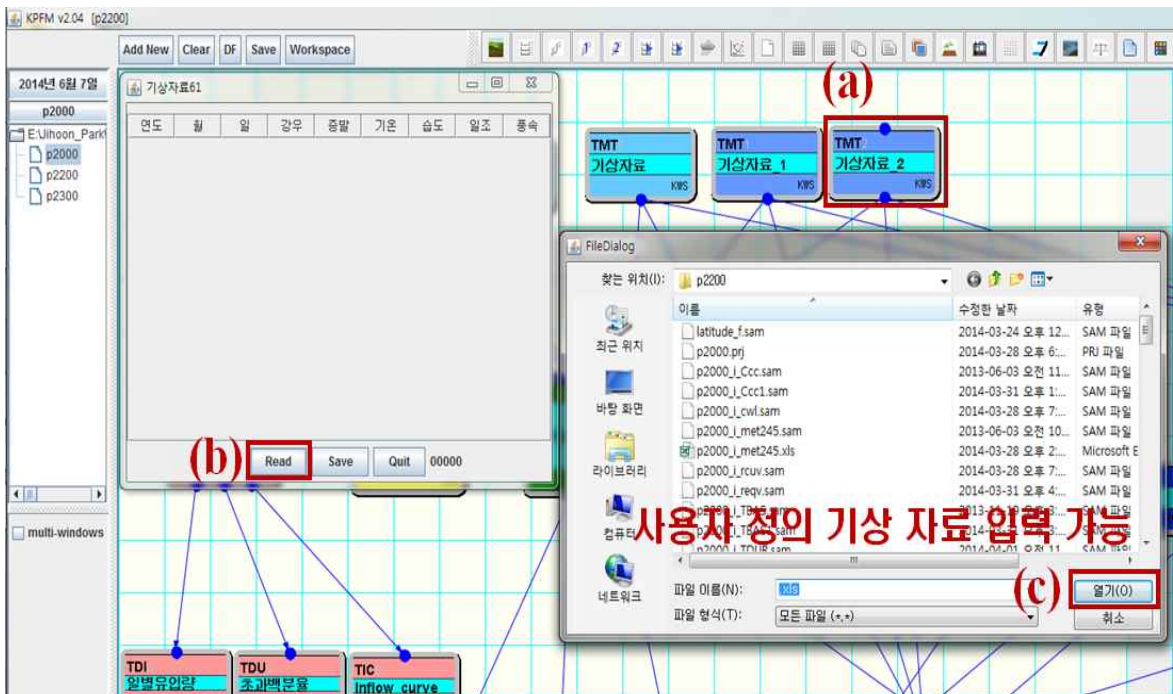
(그림 3-10-51)은 일별 출력 자료에 단위가 기재되지 않은 점을 개선한 화면이다. HOMWRS는 출력 자료를 쉼표로 구분하여 표시하였다면, COMFARM은 출력 자료를 그리드 형태로 나타내어 자료의 가독성을 높였으며 자료 상단에 단위를 표시하여 확인이 용이하도록 개선하였다.

(그림 3-10-52)는 출력 자료를 시각적으로 확인할 수 없던 점을 개선한 화면이다. HOMWRS는 출력 자료를 텍스트 파일 형식으로만 표시하였다면, COMFARM은 자료를 그리드 형태뿐만 아니라 그래프로 나타내어 분석이 용이하도록 개선하였다. 또한 연도별 출력자료와 평균값도 도시가 가능하다.

(그림 3-10-53)은 증발산량을 산정함에 있어 방법의 다양성을 제공하지 못한 점을 개선한 화면이다. HOMWRS는 Modified Penman 식만 이용하여 증발산량을 산정하였다면, COMFARM은 Penman-Monteith 식, Modified Penman 식, Blaney-Criddle 식 중 하나를 선택할 수 있는 기능을 제공하여 다각적인 분석이 가능하다. 증발산량 산정 모듈을 선택하면 상단의 3개의 버튼이 구현되어 식을 선택할 수 있도록 지원한다.

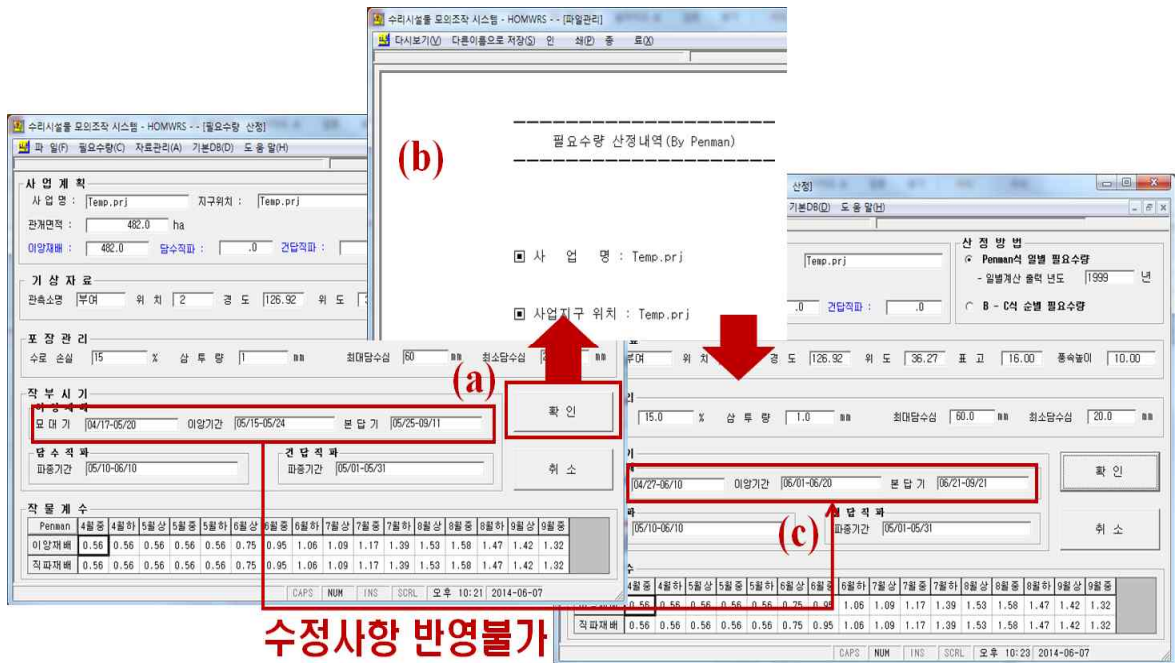


(a) HOMWRS

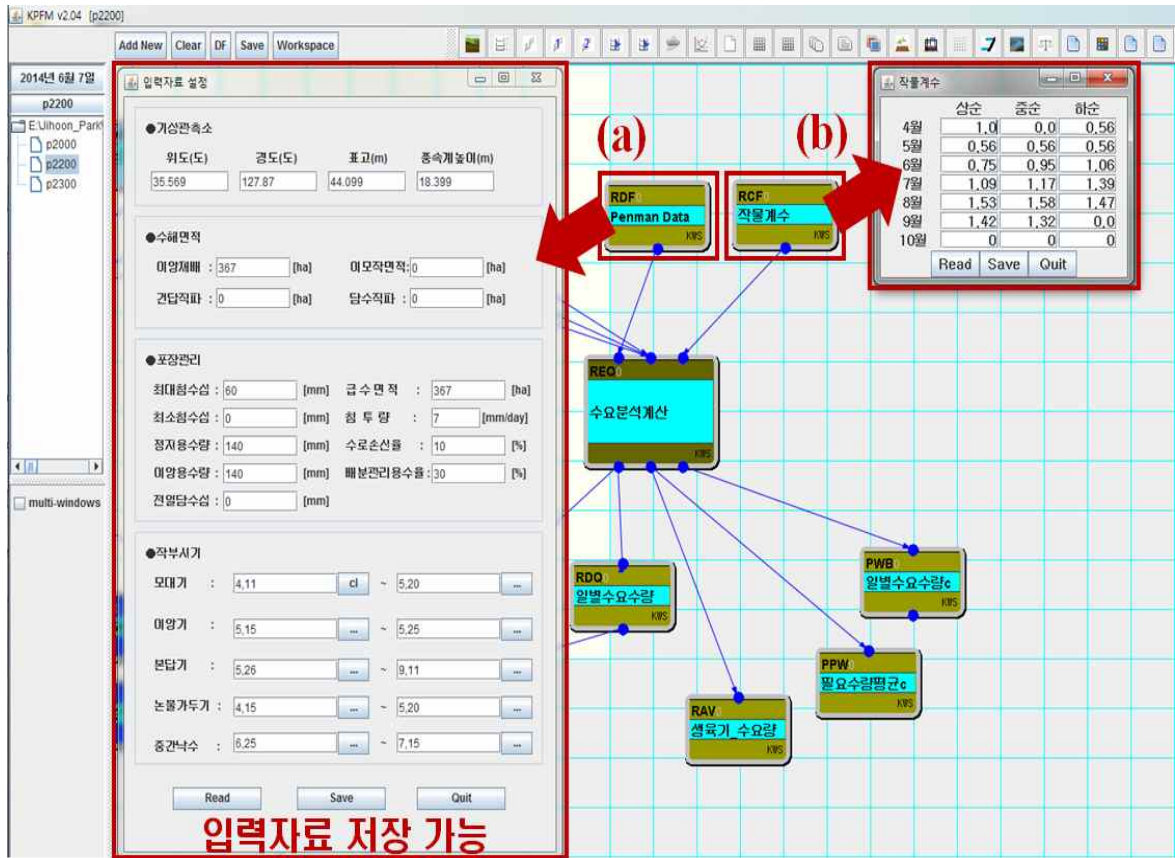


(b) COMFARM

(그림 3-10-48) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 1)

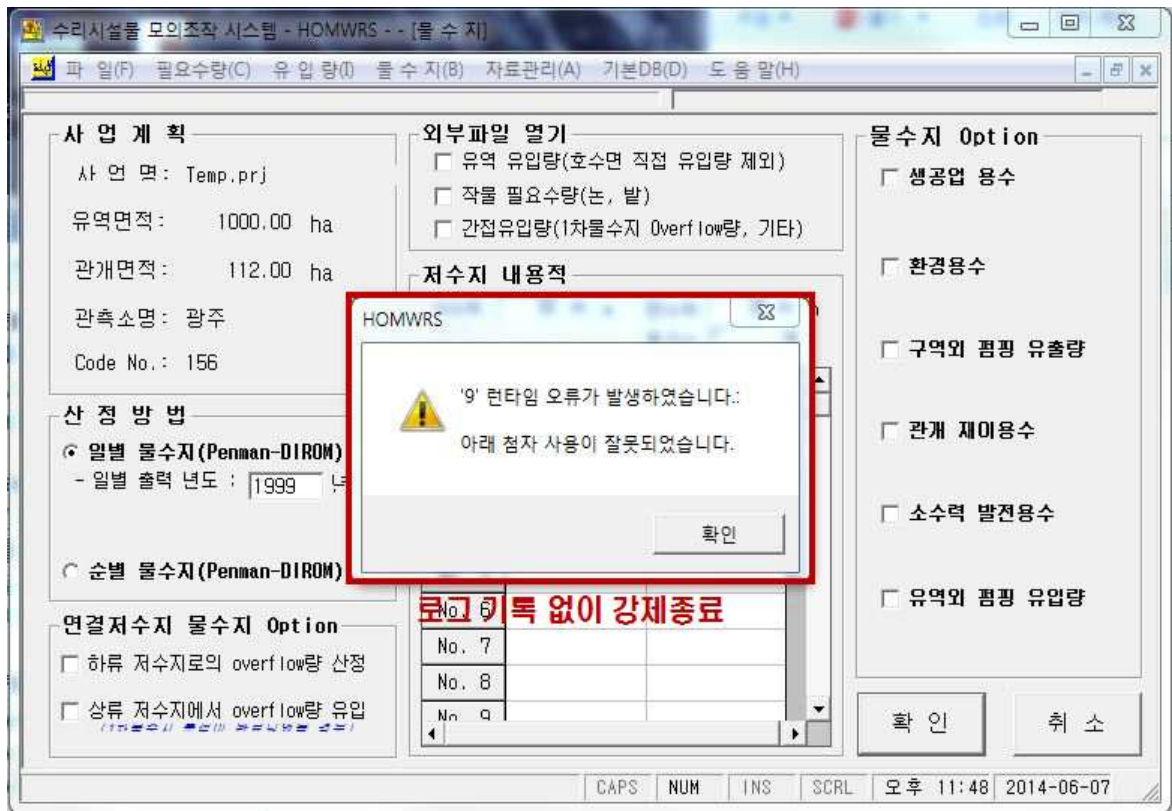


(a) HOMWRS

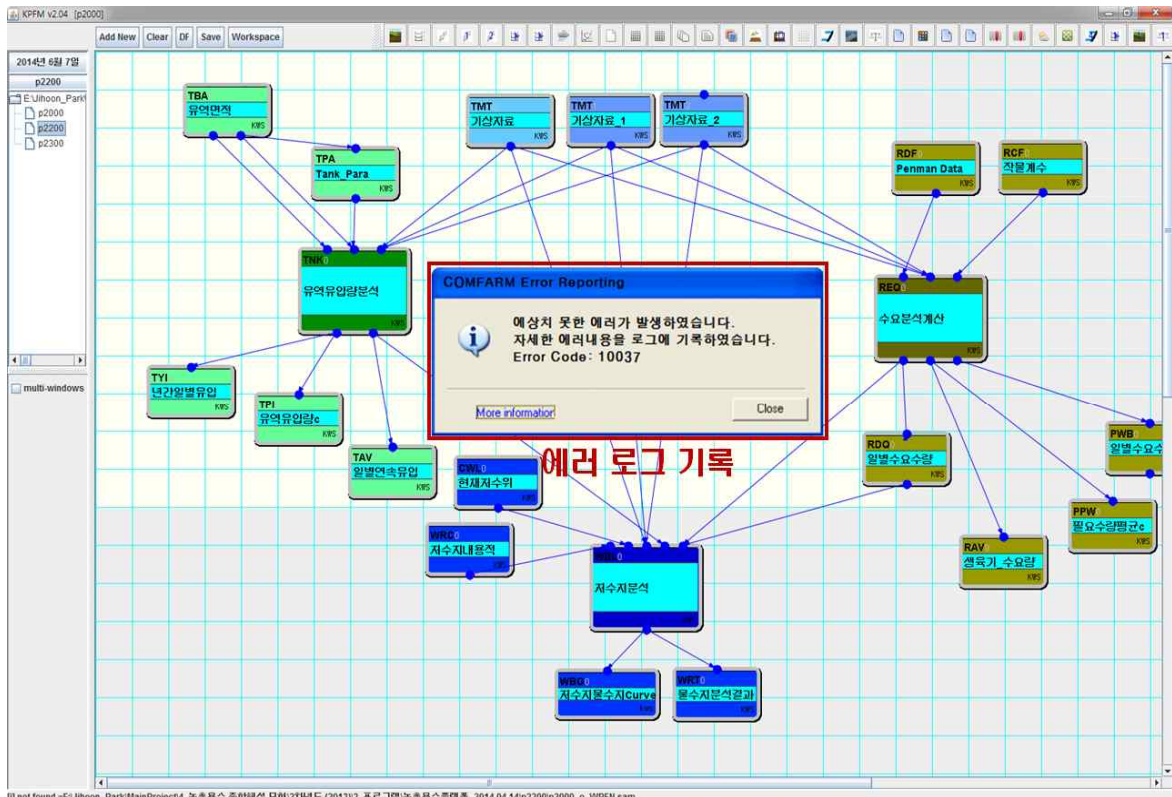


(b) COMFARM

(그림 3-10-49) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 2)

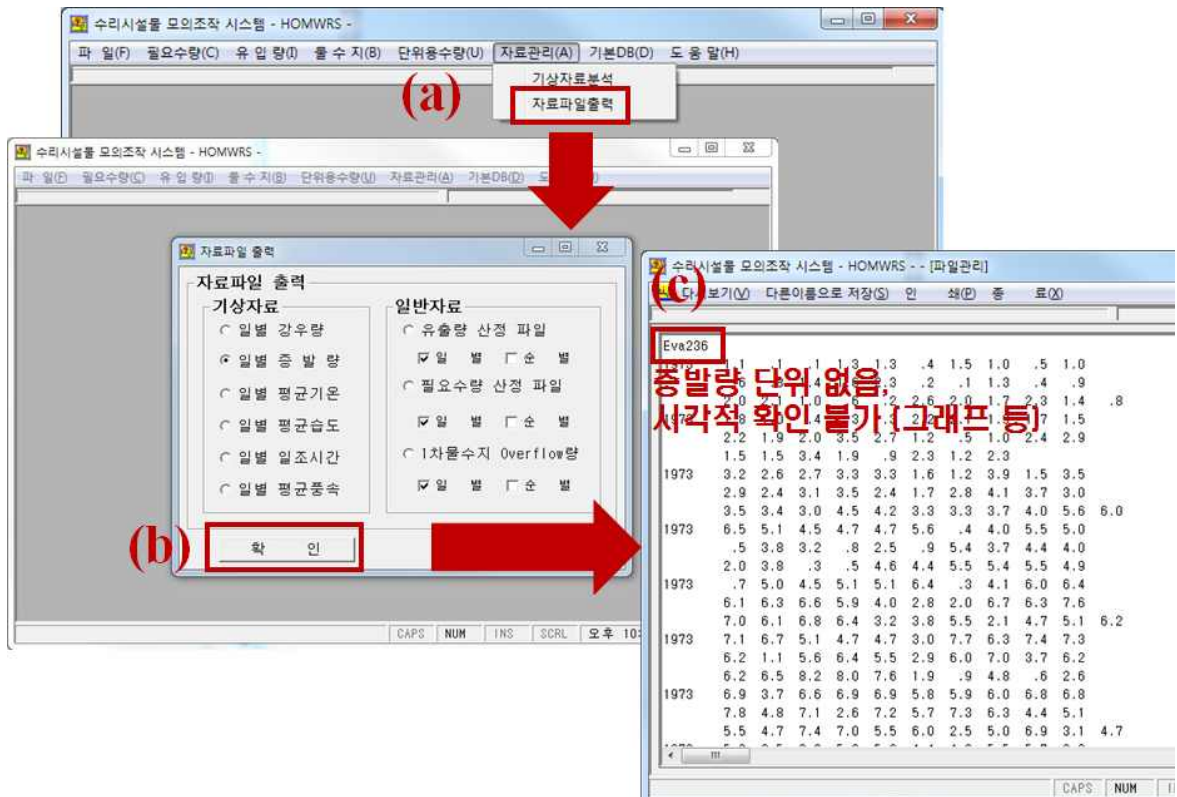


(a) HOMWRS

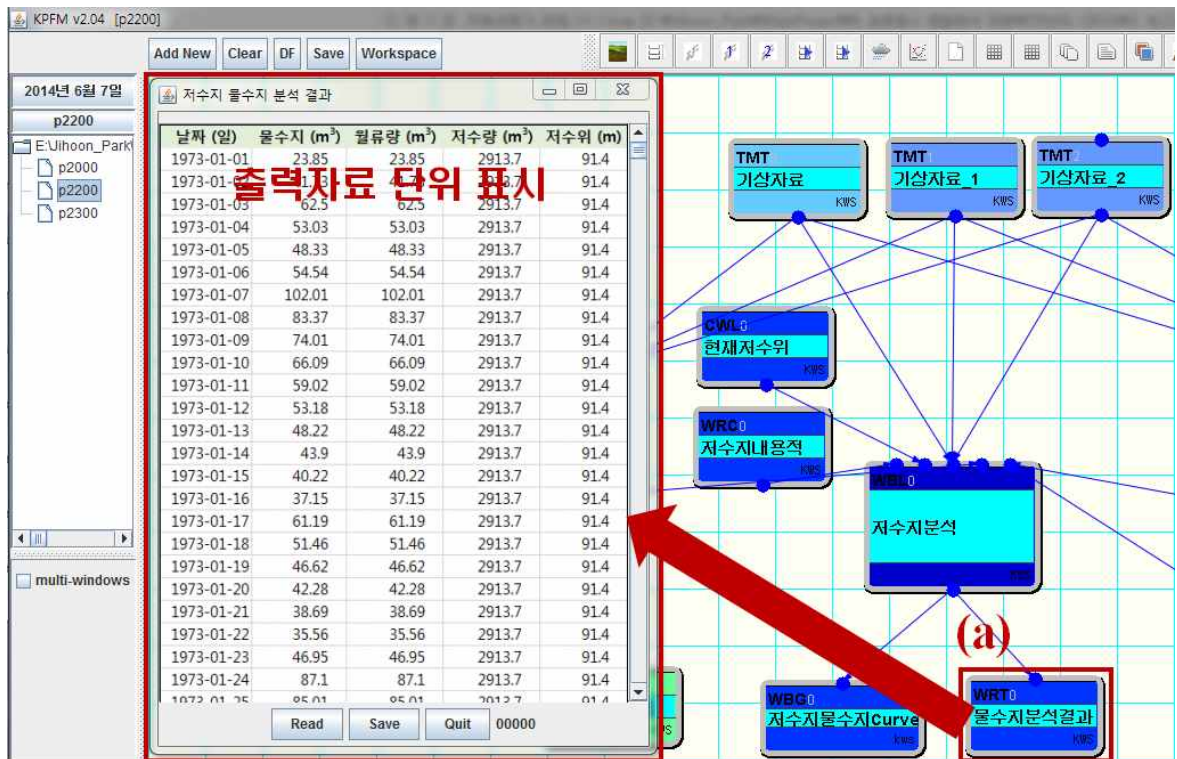


(b) COMFARM

(그림 3-10-50) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 3)

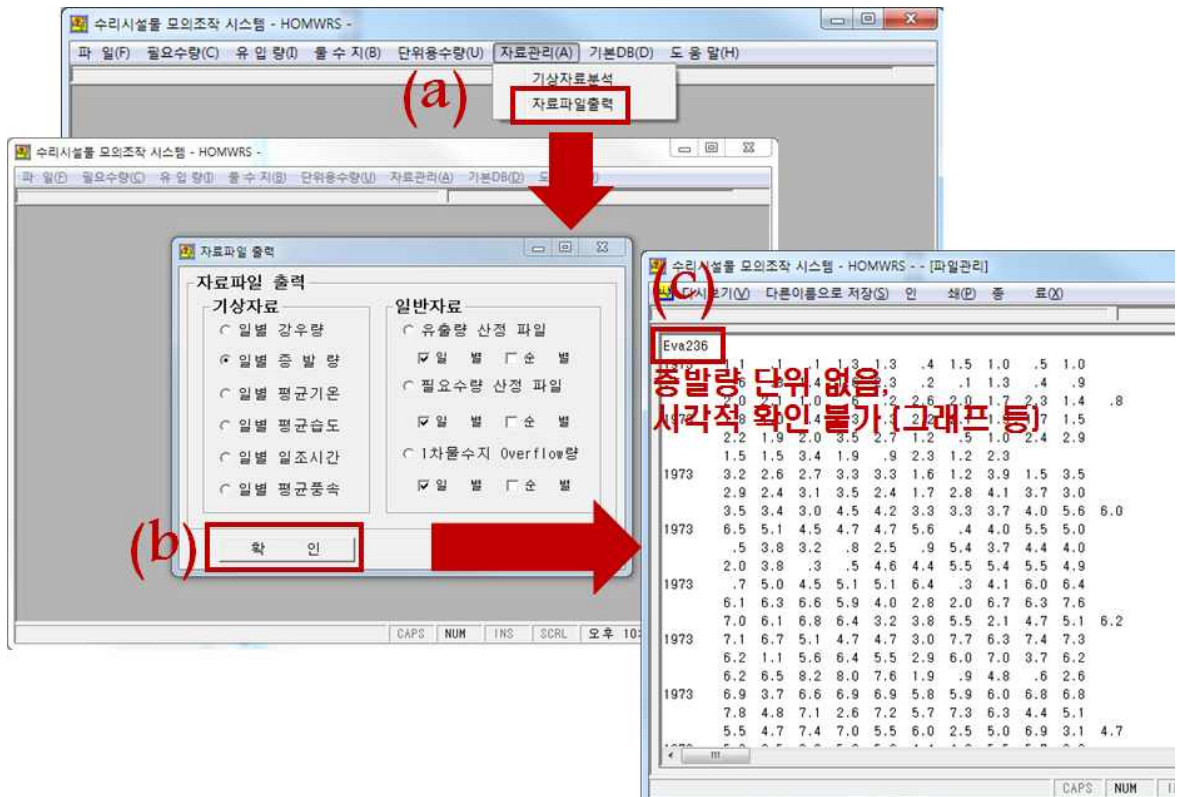


(a) HOMWRS

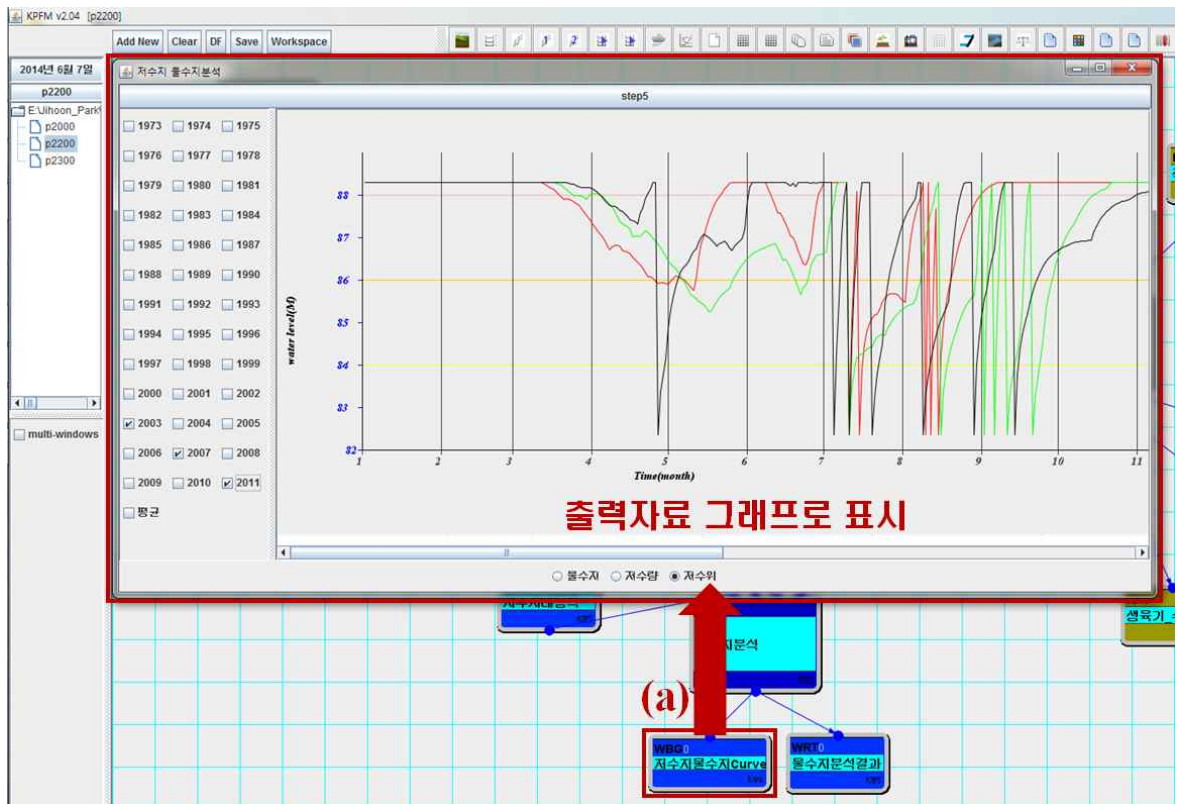


(b) COMFARM

(그림 3-10-51) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 4)

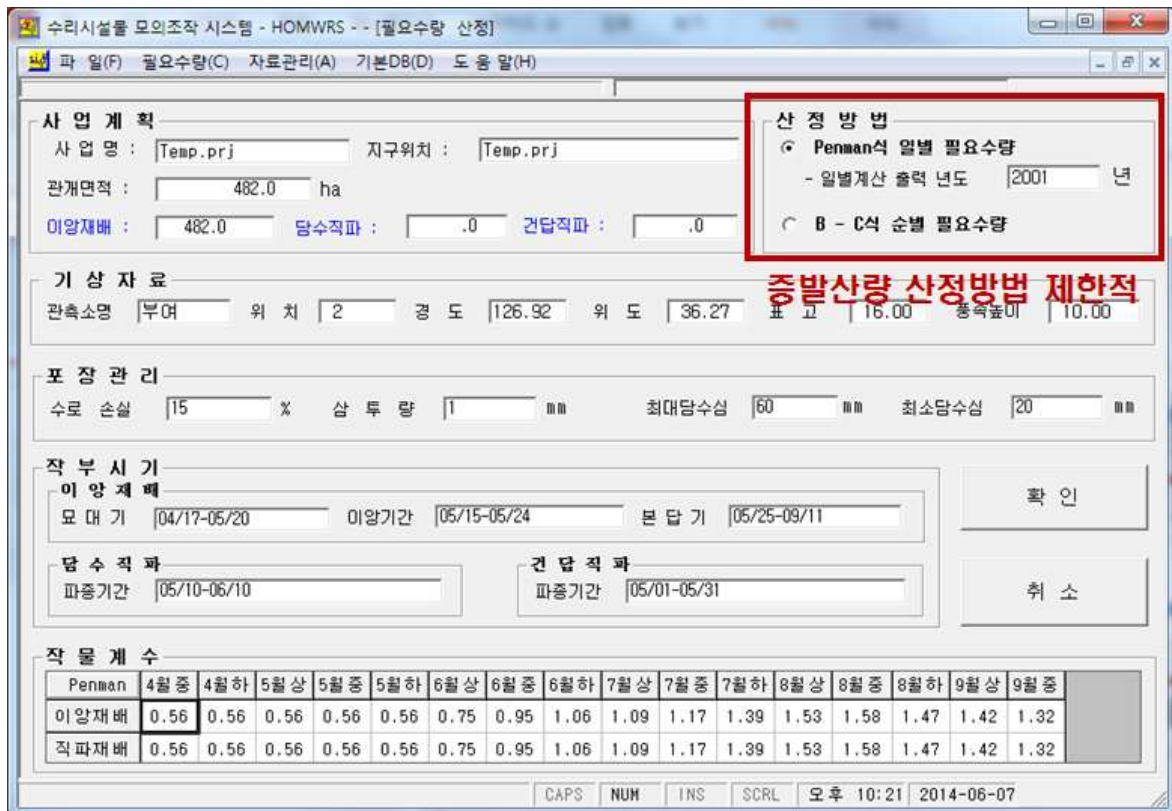


(a) HOMWRS

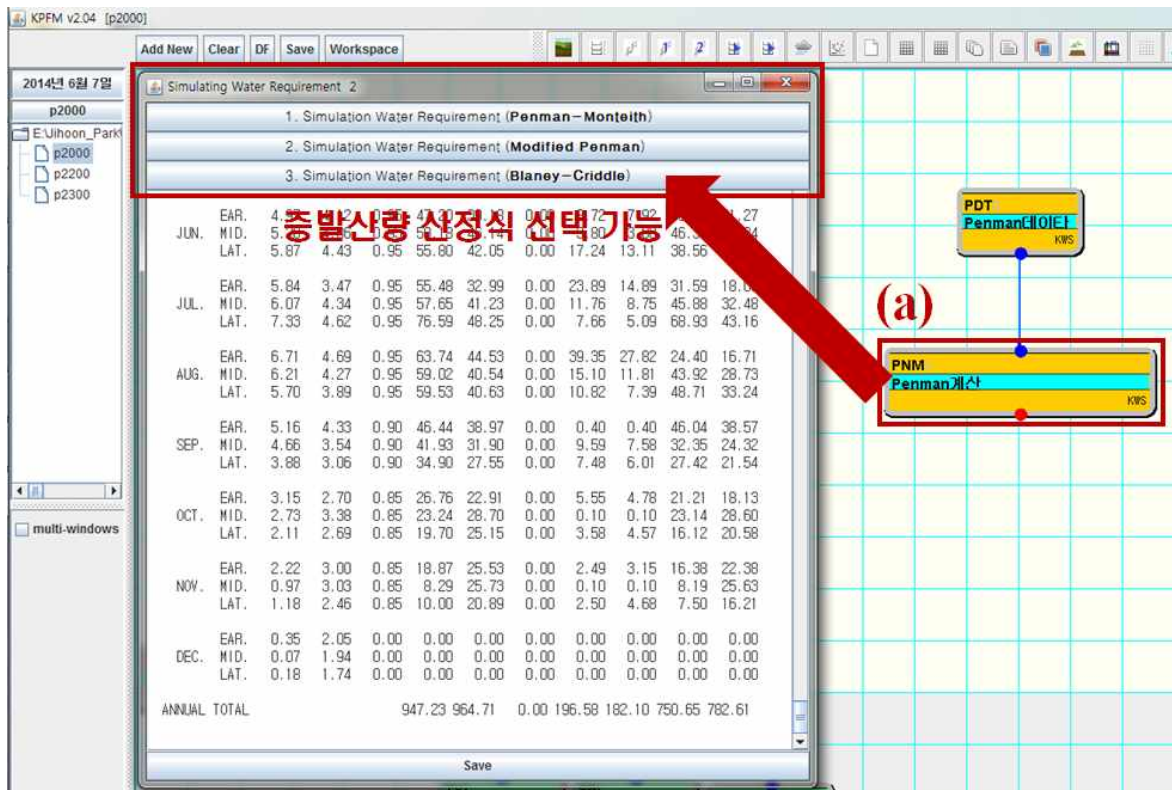


(b) COMFARM

(그림 3-10-52) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 5)



(a) HOMWRS



(b) COMFARM

(그림 3-10-53) COMFARM과 HOMWRS의 사용자 편의성 개선 구동화면 (ID: 6)

7. 요약 및 결론

본 절에서는 COMFARM (COMponent-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)을 이용하여 대화, 금평, 당월, 선암 저수지 유역에 대해 저수지 물수지 성분을 모의하였고, 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신의 6개 지선 관개지구에 대해 농업용수 공급량을 모의하였다. 모의 결과는 통계적 방법과 도식적 방법을 이용하여 실측치와 비교하여 평가하였다. 또한 농촌용수 모형 사용자 설문조사를 실시하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 동진지구는 저수지와 관개수로로 구분하여 농업용수 종합해석 모형 (COMFARM)의 적용성을 평가하기 위한 사전조사를 실시하였다. 강우자료와 수위 자료로 나누어 데이터를 구축하였으며 강우자료는 2011년 1월부터 2013년 12월까지 지구내 관측지구별 일강우 데이터를 구축하였다. 대화, 금평, 당월, 선암 저수지 유역에 대한 수위 및 제원에 대한 조사를 하였다. 또한 지구 내 용수지선에서의 수위-유량 관계식을 산정하였으며, 지점 및 데이터의 특성을 고려하여 2012년부터 2013년까지의 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 자료를 구축하였다.

② COMFARM의 저수지 물수지 성분 컴포넌트를 이용하여 대화, 금평, 당월, 선암 저수지 유역에 대해 저수지 유입량, 수면 강우량, 수면 증발량, 농업용수 공급량, 물넘이 방류량 등의 저수지 물수지 성분을 모의하였다. 모형의 보정 및 검정은 실측 저수지 수위와 모의 저수지 수위를 비교하여 평가하였다. 통계적 방법을 이용하여 평가한 결과 4개 저수지 유역에서 보정기간의 경우 R^2 는 0.79-0.90, NSE는 0.76-0.85, 모형의 일치도 d 는 0.93-0.95의 범위로 나타났으며, 검정기간의 경우 R^2 는 0.56-0.93, NSE는 0.50-0.92, 모형의 일치도 d 는 0.86-0.98로 나타났다. 도식적 방법을 이용하여 정성적으로 평가한 결과 저수지 유입량, 농업용수 공급량, 물넘이 방류량 등은 실제 유입 및 유출 기작을 반영하여 모의가 잘 이루어진 것으로 평가되었다. 특히 저수지 물수지 모의에 있어서 가장 민감한 요소인 농업용수 공급량이 유전자 알고리즘을 이용한 보정을 통해 모의가 잘 된 것으로 판단된다.

③ COMFARM의 농업용수 공급 컴포넌트를 이용하여 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선의 관개지구에 대한 농업용수 공급량을 모의하였다. 각 관개지구의 시점부 실측 공급량 자료를 이용하여 모의 공급량과 비교하였으며 통계적 분석 결과 R^2 는 0.52-0.87, NSE는 0.52-0.86, 모형의 일치도 d 는 0.83-0.97로 나타났다. 도식적 방법을 이용하여 정성적으로 평가한 결과 4-5월에 용수 공급이 집중되는 특성과 7월 중간낙수 시기에 용수 공급이 중단되는 특성이 잘 반영되는 것으로 나타났다. 이는 농업용수 공급량 모의에 있어서 중요한 매개변수인 관개효율, 침투량, 물꼬 높이, 최소담수심 등의 보정이 잘 이루어졌기 때문으로 판단된다. 또한 모형의 응용성을 평가하기 위해서 대화, 금평, 당월, 선암 저수지 유역의 저수지 물수지 성분을 모의하였고 유입 및 유출 성분의 특성을 분석하여 평가하였다. 그리고 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 관개지구의 공급량의 순별 특성을 분석하여 평가하였다.

④ COMFARM을 HOMWRS 모형과 비교하여 개선사항에 대해 고찰하였다.

COMFARM은 저수지 유입량의 경우 김현영식과 서울대학교 자체개발식 중 해당 유역 특성에 따라 선택 이용하도록 구성되어 있으며, 농업용수 공급량 모의는 복잡성 해소를 위해 못자리 용수량을 생략하고 있고, 중간낙수의 용수 공급 중단 특성이 반영되어 모의 가능하다. 또한 농업용수 공급에 있어서 가장 중요한 특징은 적절한 매개변수의 선택이며 이를 사용자가 쉽게 보정할 수 있도록 유전자 알고리즘 및 Simulated Annealing 등의 최적화 기법을 이용한 자동 보정 컴포넌트를 지원한다. COMFARM은 물넘이 방류 성분에 대해서 기존의 타 모형에서는 모의가 불가능하였으나 현재 농림수산식품부 관리 규정에 따라 운영되는 제한수위 방류기작이 포함되어 있다.

⑤ 본 연구에서는 양수장 저수지에 대해서는 모의가 이루어지지 않았으며 이는 양수량 실측치가 없기 때문이다. 따라서 양수장 실측치가 없는 양수장 저수지에 대한 모의를 위한 해석기법의 개발이 필요할 것으로 보인다. 종합적으로 COMFARM을 이용하여 동진용수관리지구에 적용한 결과 통계적/도식적으로 모형의 적용성이 검증되었다. COMFARM은 우리나라 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 고려한 지역 특이적 문제를 해결하고 용수구역단위의 농촌용수 예측 및 계획 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

⑥ COMFARM의 사용자 편의성 개선사항을 분석하였다. 기존의 HOMWRS 모형에 내재한 시스템적인 한계를 개선하여 사용자 편의성을 극대화하였다. 총 6가지의 사용자 편의성을 개선하였으며, 각각의 구동화면으로 나타내어 분석하였다. COMFARM은 사용자 편의성과 다각적인 자료 분석에 있어 효과적인 기능을 제공하는 것으로 나타났다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

본 과업의 총 연구기간은 3년으로 연구기간 동안 목표했던 세부연구 주제들의 목표 달성 정도를 평가하기 위해서는 세부 연구개발 목표 및 내용을 정량화하여 평가할 필요가 있다. 또한, 본 과업에서 도출된 결과물이 관련분야에의 기여 정도를 파악함으로써 본 연구과제의 결과를 정성적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 장에서는 연구목표와 평가착안점, 그리고 관련분야에의 기술발전 및 사회·경제적 기여도를 정리하고자 한다.

제1절 연구목표 및 평가착안점

1. 연구목표

본 연구의 최종목표는 기후변화 대응 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물 순환 해석을 위하여, ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 기술 및 통합해석 기술 개발, ② 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 Framework 및 모듈 구성, 동적 모의 플랫폼 개발, ③ 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안 수립 등을 통해 농촌수자원의 체계적/과학적 해석 시스템을 구축함으로써, 농촌용수의 물 순환 건전성을 강화하고 국가의 풍요로운 청정 수자원을 실현에 기여하고자 하는 것이다.

이와 같은 연구목표는

- ① 종합적 농촌용수 요소별 해석 모듈 설계 및 통합 해석 기술 개발
 - 농촌용수 해석 모의 요소별 첨단 해석 기술 개발
 - 요소 해석 기술의 민감도 분석 및 평가 기술 개발
 - 용수구역 단위 모형 매개변수 자동 보정 기법 개발
 - 객체지향 모델링 기법 기반의 플랫폼 설계 기법 개발
 - 농촌용수 종합정보시스템과의 연계 모듈 기법 개발
- ② 객체 지향의 요소별 해석 모듈 개발 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 객체지향 모델링 기반의 농촌용수 요소 모듈화 및 동적 모의 플랫폼 개발
 - 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축
 - 시·공간 자료의 모형 적용을 위한 전/후처리 모듈 개발
- ③ 농촌용수 종합해석모형의 시험적용·평가 및 실용화 방안
 - 농촌용수 시험지구 선정, 현장조사 및 운영
 - 농촌용수 개발모듈의 시험지구 적용 및 평가
 - 농촌용수 종합 해석 모형의 적용성 평가 및 실용화 방안

등을 통하여 달성할 수 있었다.

2. 평가 착안점

본 연구의 연구개발계획서 상의 1차년도, 2차년도, 그리고 3차년도의 평가 착안점은 다음 <표 4-1>과 같다.

1차년도에는 농촌용수 해석 기술 문헌조사 및 기법 정립의 적절성, 농촌용수해석 모형 설계의 적절성, 농촌용수 모듈 구성 및 구축 계획의 적절성, 그리고 농촌용수 테스트베드 구축 운영의 적절성이었다.

2차년도는 시공간 자료 전처리 기술의 합리성, 농촌정보시스템과 모형의 자료 호환성, 모듈간의 상호 연계 운용 편리성 및 호환성, 모듈 조합을 통한 동적모형 개발의 편리성, 그리고 테스트베드 운영 자료의 유용성이었다.

최종년도인 3차년도는 농촌용수 모형 Platform의 적절성 및 확장성, RAWRIS와의 연계 인터페이스 개발의 적절성, 테스트베드에 대한 모형 적용성 및 실용성, 그리고 모형 후처리 기술의 편리성 및 의사결정지원 여부가 주요한 평가기준이 된다.

<표 4-1> 평가의 착안점 및 기준

구분	평가의 착안점 및 기준	
	착안사항	기준(%)
1차년도 (2012)	농촌용수 해석 기술 문헌조사 및 기법 정립의 적절성 농촌용수해석 모형 설계의 적절성 농촌용수 모듈 구성 및 구축 계획의 적절성 농촌용수 테스트베드 구축 운영의 적절성	25 25 25 25
2차년도 (2013)	시공간 자료 전처리 기술의 합리성 농촌정보시스템과 모형의 자료 호환성 모듈간의 상호 연계 운용 편리성 및 호환성 모듈 조합을 통한 동적모형 개발의 편리성 테스트베드 운영 자료의 유용성	15 20 20 25 20
3차년도 (2014)	농촌용수 모형 Platform의 적절성 및 확장성 RAWRIS와의 연계 인터페이스 개발의 적절성 테스트베드에 대한 모형 적용성 및 실용성 모형 후처리 기술의 편리성 및 의사결정지원 여부	25 25 25 25

제2절 연구개발 목표 및 내용의 달성도

본 과제의 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용을 종합적으로 정리하면 <표 4-2>와 같다. 또한, <표 4-2>에는 그 목표 및 내용의 달성도를 나타냈으며, 본 최종보고서상 해당 부분의 기술 위치 (장 및 절)를 비교에 나타냈다. 세부 연구개발 목표 및 내용을 자체적으로 평가한 결과 모든 내용에 대한 달성도는 100%로 나타났다. 세부 연구개발 목표 및 내용, 그리고 그 달성도에 대한 자세한 서술은 다음과 같다.

<표 4-2> 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용의 달성도

구분	연구개발의 목표	연구개발의 내용	달성도										비고			
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
서울대학교 (제1세부)		국내외 모형 적용 요소기술 현황 조사														2장, 6장
		요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성														3장 1,2,3절
		모형의 구성요소 결정 및 Framework 설계														3장 7절
		농촌용수 분석 객체 모델링 기법 설계														3장 6,7절
		○ 농촌용수 해석 요소 구성 및 농촌용수 모형 Framework 설계														3장 8절
		○ 시·공간 자료 전처리 기술 조사														3장 8절
		○ 농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발														3장 1,2,3절
		○ 농촌용수 종합정보 DB와 연계 기술 개발														3장 3절
		○ 객체기반 농촌용수 해석 Platform 구성 및 종합모형 개발														3장 8절
		○ 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발														3장 4,8절
			모의 요소별 모듈 상호 호환성 확보													3장 6절
			모의 요소간 연계 및 모형 최적화													3장 4,6절
			모의 자료의 분석, 그래프화 등 후처리 기술 개발													3장 6절
		모의결과 기반 의사결정 지원 기술 개발													3장 5절	

<표 4-2> 연구계획서상 연구개발 목표 및 내용의 달성도 (계속)

구분	연구개발의 목표	연구개발의 내용	달성도										비고						
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100							
농어촌 연구원 (제1협동)	○ 농촌용수구역 Testbed 선정 및 모니터링 시스템 구축 ○ 시험지구 설치·운영 및 수문/수질 자료 수집 ○ 수집 자료의 데이터베이스화	시험지구 선정, 현장조사 및 설계																3장 9절	
		시험지구 현장 운영 및 자료 수집, DB 구축																	3장 9절
		농촌용수 모니터링 시험구역 운영 : 시험지구 운영을 위한 모니터링																	3장 9절
		농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 : 사용자 모형 설문조사																	<첨부 III>
		시험지구 현장 수리시설 및 물관리 조사																	3장 2,8,9,10절
		종합해석 모형의 적용성 분석																	3장 10절
		연구개발 성과의 효과 분석																	제 4, 5 장
		사용자지침서 작성 실용화시범사업 제시																	<첨부II>
(주)부린 제2협동	○ 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발 ○ 동적 모의 플랫폼 개발 ○ 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축 ○ Testbed 대상의 모형의 적용 및 보완	농촌 용수구역 관련 자료조사 및 분석																3장 8절	
		객체지향 모델링 기반 요소기술 개발																3장 1,2,3,6절	
		모듈 기반의 플랫폼 개발																	3장 6절
		모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석																	3장 6절
		한국농어촌공사 농촌용수 관련 시스템 연계를 통한 DB 인터페이스 구축																	3장 8절
		타기관 관련자료 연계 DB 인터페이스																	3장 8절
		Testbed 대상의 필요자료 구축																	3장 8,10 절
		개발된 모형의 적용 및 수정 보완																	3장 6절

1. 세부 연구개발 목표

본 과업의 참여 연구기관은 제1세부 서울대학교, 제1협동 농어촌연구원, 제2협동 (주) 부린으로 구성되어 있다. 제1세부 서울대학교의 세부 연구개발 목표는 시·공간 자료 전처리 기술 조사, 농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발, 농촌용수 종합정보 DB와 연계 기술 개발, 객체기반 농촌용수 해석 Platform 구성 및 종합모형 개발, 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발이다.

제1협동 농어촌연구원의 세부 연구개발 목표는 농촌용수구역 Testbed 선정 및 모니터링 시스템 구축, 시험지구 설치·운영 및 수문/수질 자료 수집, 수집 자료의 데이터베이스화이었다.

제2협동 (주)부린의 세부 연구개발 목표는 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발, 동적 모의 플랫폼 개발, 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축, Testbed 대상의 모형의 적용 및 보완이었다.

2. 세부 연구개발 내용 및 달성도

2.1. 국내외 모형 적용 요소기술 현황 조사

본 연구에서는 국내외 모형 적용 요소기술 현황을 조사하기 위하여 SWAT, HSPF, SWMM, GWLF, Tank 등을 포함한 40여개의 모형 관련 보고서/논문/단행본을 참조하였으며, 핵심내용을 [제 2 장 국내외 기술개발 현황]과 [제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보]에 기술하였다. 본 연구에서 조사한 국내외 모형 적용 요소기술 현황을 정리하여 <수질모델링의 이해 및 적용: 도서출판 마루북스, ISBN 978-89-97259-02-1 93530>라는 단행본을 발간하여 모형을 처음 접하는 연구자가 쉽게 적용할 수 있는 기회를 마련하였다.

수문 모형을 적용 대상지역, 수문사상, 공간적 범위 (유역, 포장, 지점), 물리적 관계의 분석 유무 (결정론적, 비결정론적), 매개변수의 공간적 변화 고려 유무 (집중형, 분포형)에 따라 구분하였으며, 수문 모형의 개발현황을 미국에서 개발된 수문 모형을 중심으로 1970년대에서 현재까지를 5단계로 구분하여 분석하였다.

모의요소별 적용 기법으로 SCS CN법, Richard, Philip, Smith & Parlange법, Green & Ampt, Horton, Modified Holton-Overton, Dynamic wave, Diffusive wave, Kinematic wave식, 비선형저류방정식, Muskingum, Darcy 법칙, 수정 Penman, Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Hargreaves, Ritiche식, Braney-Criddle 등을 조사하였다.

2.2. 요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성

본 연구에서는 우리나라 환경조건에 맞는 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 선정을 위하여 국내외 모형에 적용되고 있는 모의요소별 해석 기법을 조사/분석하고, 이를 바탕으로 적정 해석 기법을 복잡성 및 사용자의 편의성을 고려하여 선정하였다. 선정된 모의기법은 [제 3 장 제 1, 2, 3절]에 상세히 서술되어 있다.

선정된 기법은 <복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의 모형의 개발>, <유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발>, <농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발>, <미계측 유역 오염부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수

추정>이라는 주제로 서울대학교 석사학위논문 청구 심사를 통해 적용성을 평가하였다.

또한, 학술지 논문으로 <복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발>, <농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발>, <유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가>, <저수지 관개지구의 농업용수 회귀특성>, <연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의>, <TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발>가 익명의 심사위원으로부터 Peer Review 후 게재되어 선정 기법의 적용성을 입증하였다. 특히 첫 번째 논문은 한국농공학회 우수논문상을 수여받았다.

이외에 <Paddy Field Modelling System for Water Quality Management>라는 주제가 게재 확정되어 적용성이 인정되었으며, 또한 <Water Balance Analysis of Agricultural Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation>라는 주제가 SCI 학회지에 투고하여 개발 기법의 적용성 평가를 위해 심사 중에 있다.

2.3. 모형의 구성요소 결정 및 Framework 설계

GF, OMS, ICMS, TIME, OpenMI 등의 구조 및 개발 과정을 고찰하여, 농촌용수 물순환 종합해석을 위한 Framework를 설계하였다.

농촌용수 물순환 해석 Framework는 전처리 시스템, 주 객체 처리 시스템, 후처리 시스템으로 구분되도록 설계하였다. 전처리 시스템에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 방대한 자료를 관리할 수 있는 자료 관리 및 표준화 시스템과 연동하여 맞춤형 모형에 필요한 입력 자료 (기상, 지형, 영농자료)를 제공하고, 주 객체 처리 시스템에서는 객체 지향 모델링 기법 기반의 플랫폼을 통해 사용자 목적에 맞는 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하고, 후처리 시스템에서는 사용자가 구축한 맞춤형 모형의 매개변수를 자동 보정 및 검증하는 최적화 모듈과 그래프, 표, 보고서를 출력할 수 있는 모듈을 제공하도록 설계하였다. 자세한 내용은 [제 6 장]과 [제 3 장 제 7 절]에 서술되어 있다.

2.4. 농촌용수 분석 객체 모델링 기법 설계

본 연구에서는 농촌용수 물순환 요소 및 기법을 각각의 컴포넌트로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 특정 문제에 맞게 필요한 모듈을 선정하고 배열하여 맞춤형 모델을 구축할 수 있는 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 해석 Framework인 COMFARM을 개발하였다. COMFARM의 구성 모듈은 COMFARM 시스템 (COMFARM System), 환경 관리자 (Configuration Manager), 모형 관리자 (Model Manager), 자료 관리자 (Data Manager), 모형 래핑 관리자 (Model-wrapping Manager), 그리고 그래픽 사용자 인터페이스 (Graphical User Interface) 등 총 6개이다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 6, 7절]에 상세히 서술되어 있다.

본 연구 개발 COMFARM은 <Development of a Component-based Modeling Framework for Agricultural Water-Resource Management>라는 주제로 SCI 학회지 게재를 위해 심사 중이다. 또한, COMFARM은 <농촌용수해석 모델링 방법 및 장치>라는 제목으로 특허 출원 후 등록을 위해 심사 중이다. 그리고 COMFARM은 <농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개>라는 제목으로 전원과 자원 매체에서 홍보되었다.

2.5. GIS기반 자료로부터 수문/수질 계수 추출방법 조사 및 적정방안 선정

본 연구에서는 GIS자료로, DEM, 수계도, 토지이용도, 토양도, 지형도 등을 구축하였다. 또한, 구축된 지형정보로부터, 유역을 추출하고, 유출량 산정을 위한 유출곡선번호지수 추출, 토양유실 인자를 결정하는 방법을 정립하고 인자를 산정하였다. [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.6. 모형 입력자료 구축 및 연계기술 정립

본 연구 개발 요소기술의 적용성 평가를 위하여 모형 입력자료를 구축하였으며 [제 3 장 제 1, 2, 3절]에 상세히 서술되어 있다.

본 연구에서 개발한 저수지 상류유역 수문·수질 해석기법 (제 3 장 제 1 절), 농업용 저수지 수문·수질 해석기법 (제 3 장 제 2 절), 그리고 저수지 하류유역 수문·수질 해석기법 (제 3 장 제 3 절)은 각각이 독립적인 것이 아니라 모의요소 간 연계되어 있으며, 본 연구에서 개발한 COMFARM에서는 요소 모듈을 연계하여 물순환 요소를 해석하는 환경을 제공한다. [제 3 장 제 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.7. 해석 요소별 모의 기술 정립: 수치모형 or 경험공식 등

농업유역을 저수지 상류유역, 농업용 저수지, 저수지 유역으로 구분하였다. 저수지 상류 유역의 모의요소로는 유역 유출량, 유역 증발산량, 지하 침투량, 그리고 상류 배출부하량을 선정하였다. 저수지 하류 유역의 모의요소로는 증발산량, 유효우량, 필요수량, 송수 손실량, 용수로 배수량, 논 포장 배수량, 시설재배지 유출량, 비관개지구 유출량, 지하수 유출량, 논 비점 배출부하량, 그리고 하류 배출부하량 등을 선정하였다. 농업용 저수지의 모의 요소로는 농업용수 공급량, 만수위 방류량, 제한수위 방류량, 환경용수 공급량, 저수지 수위, 그리고 저수지 수질 등을 선정하였다. 이에 관한 자세한 내용은 [제 2 장 국내외 기술개발 현황]에 상세히 서술되어 있다.

앞서 [나. 요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성]에서 기술하였듯이 해석 요소별 모의 기술 정립을 정립하였으며, 4편의 학위 논문, 7편의 학술지 논문, 1편의 SCI 논문, 그리고 이외의 수편의 학술대회 발표에서 해석 요소 모의 기술의 적용성이 평가되었다. 정립된 해석 요소별 모의 기술은 [제 3 장 제 1, 2, 3절]에 상세히 서술되어 있다.

2.8. 논문에서의 수문/수질 기작 모의 기술 개발

국내외에서 개발된 대부분의 논문에서의 수문/수질 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양의 수리학적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없다. 기존의 모형의 또 다른 제약조건으로는 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서 사용자 맞춤형 전·후처리 컴포넌트가 모형에 추가될 필요가 있다.

본 연구에서는 저수지 하류유역의 수문·수질을 해석하는 모형을 COMFARM을 기반으로 설계하였다. 논문에서의 수문 및 수질 모의 모형 (수정 CREAMS-PADDY 모형)은 CREAMS-PADDY 모형을 수정/개선하고 전·후처리 컴포넌트를 추가하여 개발하였다. 해당 내용은 <Paddy Field Modeling System for Water Quality Management>이라는 주제로 SCI급 학술지에서 심사되었으며, 게재 확정되어 그 적용성이 평가되었다. 상기 내용

은 [제 3 장 제 3 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.9. 농촌용수종합정보 시스템 인터페이스 구축 방안 정립

농촌용수지구의 물 순환 해석을 위한 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템을 개발하였다. 상기 시스템을 통해 실시간으로 제공하는 시계열 자료를 일단위로 SQL 및 API 기법을 이용하여 DB로 구축하고, 자료 품질 관리를 수행하였다. 또한, 남한강 하류 청미천 상류유역과 근삼리 유역에 대해 자료 관리 시스템의 적용성을 검토하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.10. 실시간 측정 자료의 표준화 및 연계 모형 검·보정 기술

농촌용수종합정보해석을 위해 구축된 데이터베이스를 기반으로 자료 표준화 시스템을 개발하였다. 기상청 등에 실시간으로 접속하여 구축된 데이터베이스에서 기상 및 수문 자료를 웹사이트에 도시화하여 종류별/기간별로 사용할 수 있도록 설계하였고, 물순환 모형에 대한 입력 자료에 맞추어 자료를 표준화하는 기법을 구축하였다. 또한, 본 연구에서는 편의보정 방법으로 분위사상법을 선정하여 지역기후변화 시나리오에서 산출된 과거 및 미래 강수 자료의 극한사상을 보정하였다. 본 내용과 관련하여 <PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE> 라는 주제로 SCI급 논문에 투고하였으며, 게재 확정되어 그 적용성이 평가되었다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다.

본 연구에서 개발한 매개변수 보정 및 검정 모듈에서는 최적화 기법으로 유전자 알고리즘, Simulated Annealing 등을 지원하며 그 기법들에 대해 정리하였다. 또한, 최적화 모듈의 실제 적용방법을 소개하기 위해 수정 3단 Tank 모형을 대상으로 매개변수 최적화 과정 (목적함수 설정방법, 제약조건 설정방법)을 기술하였다. 해당 내용은 <최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개> 라는 제목으로 [전원과 자원] 매체를 통해 소개되었다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 4 절]에 서술되어 있다.

2.11. 모의 요소별 모듈 상호 호환성 확보

COMFARM은 입력 모듈, 모의 모듈, 그리고 출력 모듈 간 연결을 통해 모듈 상호간 관계를 쉽게 확인할 수 있도록 구성되어 있으며, 입력 매개변수 수정과 그에 따른 출력자료의 변화 또한 쉽게 확인이 가능하다. 객체 모듈을 조합하여 Case-Study를 수행하였으며, 모의요소별 모듈간 입·출력 자료의 연계가 잘 이루어지는 것으로 나타났다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 6, 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.12. 모의 요소간 연계 및 모형 최적화

COMFARM은 사용자가 전처리/주 객체 처리/후처리와 관련된 여러 컴포넌트를 조합하여 이용 목적에 따라 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하는 Framework이다. 본 연구에서는 [제 3 장 제1, 2, 3절]에서 개발한 농촌용수 물순환 해석 요소기술, [제 3 장 제 8 절]에서 개발한 자료 관리 및 표준화시스템, [제 3 장 제 4 절]에서 개발한 매개변수 최적화 모듈, 그리고 그래프 및 표 생성 모듈 등을 각각의 컴포넌트로 구성하였다. COMFARM은 컴포넌트 기반으로 개발되었기 때문에 컴포넌트 간 연관관계를 정의할 필요

가 있으며, 이를 정의하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 7 절]에 상세히 서술되어 있다.

본 연구에서 개발된 각 해석기법의 매개변수는 유전자 알고리즘 등 최적화 기법을 이용하여 보정이 이루어졌다. 통계 지표를 통한 평가 결과 본 연구 개발 해석 기법은 우수한 것으로 나타났다. 각 해석기법에 대한 모형 최적화 결과는 [제 3 장 제 1, 2, 3 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.13. 모의 자료의 분석, 그래프화 등 후처리 기술 개발

COMFARM은 모듈의 유형으로는 입력 모듈, 모의 모듈, 그리고 출력 모듈로 구성된다. 입력 모듈은 기상자료, 유역 특성자료, 영농 자료 등이 구축된 데이터베이스와 연동되어 입력 자료를 불러온다. 모의 모듈은 모의 요소의 계산이 이루어지는 부분으로 TANK 모형, Penman-Monteith 식, 저수지 물수지 식 등으로 구성된다. 출력 모듈은 모의 모듈에서 생성된 결과를 표, 그림, 그리고 보고서 등으로 나타낸다.

본 연구에서는 범용 출력 모듈을 개발하였으며, EXCEL 등 외부 프로그램을 이용하지 않고 시계열 그래프 등을 그릴 수 있다. 또한, 타이틀의 내용, 색, 폰트, 폰트사이즈의 수정과 X-Y 및 T-R축의 최소값, 최대값, 간격, 그리고 단위 등을 수정할 수 있다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 6 절]에 서술되어 있다.

2.14. 모의결과 기반 의사결정 지원 기술 개발

본 연구에서 개발한 해석기법의 모의결과를 기반으로 의사결정을 지원하는 기술을 개발하였다. 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 물수지 해석지원 기술, 비관개기 환경용수 공급에 따른 저수지 수위 관리 기술, 그리고 논에서의 영농방법에 따른 유역단위 배출부하량 저감효과 분석지원 기술 등을 개발하였으며, 자세한 내용은 [제 3 장 제 5 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.15. 시험지구 선정, 현장조사 및 설계

농촌용수구역의 국내 시험지구는 시험·운영 및 분석이 가능함과 동시에, 일선 물관리 기관 (한국농어촌공사 지사 혹은 시·군 지자체)에서 실시하고 있는 기존의 모니터링과의 비교가 가능하고, 또한 농업용수 시험지구로써의 대표성을 가지기에 적합한지의 여부 등 다양한 조건이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 상기 조건을 고려하여 현장조사 등을 실시하였으며, 그 결과 이동지구, 동진지구, 농어촌연구원 시험포장등 총 3개의 대상지구를 선정하였다. 또한 국내 시험지구와 조건이 다른 해외 시험지구로 우즈베키스탄 타슈켄트 지구를 선정하였다. 시험지구에는 강우계, 저수지/하천/용배수로 수위 관측을 위한 초음파 수위계 등을 설치하여 농촌용수 물순환 모니터링 시스템을 구축하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 9 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.16. 시험지구 현장 운영 및 자료 수집, DB 구축

국내 모니터링 대상지구인 이동지구, 동진지구, 농어촌연구원 시험포장에서 관측한 강우량, 풍속, 기온, 상대습도, 일사량 등을 포함한 기상자료, 하천 유출량, 저수지 수위, 그리고 농업용수 공급량 등의 자료를 수집하였으며, 자료의 품질을 확인하였다. 또한, 국외 모니터링 대상지구의 자료를 수집하였으며, 상기 국내외 자료를 종합하여 DB를 구축하였다.

이외에 농촌용수 시범지구인 청미천 상류역과 근삼리 유역에 대한 유량 및 수질자료를 DB로 구축하였다. 또한 춘포면 용연리에 논 포장에 대한 토양자료로, 모니터링 시기별, 처리구별, 심도별로 pH, EC, TN, TP, TOC 항목에 대한 자료를 DB로 구축하였다. 용남 지구에 대한 영농자료로, 묘대기, 이앙기, 본답기, 논물가두기 등의 영농변화 등의 자료를 수록하여 DB로 구축하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 8, 9 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.17. 농촌용수 모니터링 시험유역 운영 : 시험지구 운영을 위한 모니터링

본 연구에서는 대상지구인 이동지구의 용덕, 미산, 이동, 은산 지점에서 강우량을 관측하였다. 또한, 용덕, 미산, 이동 저수지의 저수위자료와 농업용수 공급량을 관측하였다. 이동지구의 미산교, 묵방교, 덕성교, 재인교의 하천 유출량을 관측하였다. 동진지구의 지구내 용수지선 수위-유량 관계식을 산정하였으며, 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 시점 및 말단 유량을 비교하여 농업용수 공급량을 분석하였다. 또한, 연구원 시험포장의 농업용수 공급량 자료를 관측하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 9 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.18. 농촌용수 종합해석 모형의 적용성 평가 : 사용자 모형 설문조사

모형 사용자 설문조사는 대학, 연구기관, 사업기관 등 농촌용수 관련 분야 전문가들을 대상으로 설문을 실시하였다. 설문내용은 농촌용수 해석 관련 가장 많이 사용되는 모형을 조사하였고, 본 연구 개발 시스템의 최종이용자를 조사하였다. 또한, 의사결정 시 가장 유용하게 활용될 사항, 모형의 우선 고려사항을 조사하였으며, 그리고 기존의 모형 중 가장 적절한 모형에 대해 조사하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 10 절]에 서술되어 있다.

2.19. 시험지구 현장 수리시설 및 물관리 조사

본 연구에서는 선행연구 문헌 및 저수지 제원 보고서 등을 조사하여 대표 저수지에 대한 논물가두기, 묘대기, 이앙기, 본답기, 중간낙수기, 완전낙수기, 그리고 홍수기 제한수위 관리기 등의 물관리 현황을 조사하였으며, 이를 DB로 구축하였다. 또한, 현장 수리시설 물관리 조사가 이루어지지 않는 저수지에 대해서는 저수지 수위를 통해서 물관리를 파악할 수 있는 기법을 개발하였다. 본 내용은 [제 3 장 제 2, 8, 9, 10 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.20. 종합해석 모형의 적용성 분석

본 연구에서는 COMFARM을 동진지구 Testbed를 대상으로 그 적용성을 분석하였다. 대화, 금평, 당월, 선암 저수지 유역에 대해 저수지 물수지 성분을 모의하였고, 화호, 대평, 감곡, 신용, 용성, 종신의 6개 지선 관계지구에 대해 농업용수 공급량을 모의하였다. 모의 결과는 통계적 방법과 도식적 방법을 이용하여 모니터링 실측 결과와 비교하여 평가하였다. 그 결과 저수지 유입량, 농업용수 공급량, 물넘이 방류량 등은 실제 유입 및 유출 기작을 반영하여 모의가 잘 이루어진 것으로 평가되었다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 10 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.21. 연구개발 성과의 효과 분석

본 과업의 세부 연구개발 목표 및 내용을 정량화하여 평가하였다. 또한, 본 과업에서도 출된 결과물이 관련분야에의 기여 정도를 파악함으로써 본 연구과제의 결과를 정성적으로 평가하였다. 자세한 내용은 본 장에 서술되어 있다.

본 과제 연구개발 성과 목표 및 달성도를 특허/논문게재/학술발표/정책자료제안/홍보/인력양성/단행본발간/수상 실적 등으로 구분하여 정리하였다. 또한, 본 연구를 통한 성과 활용 계획으로 실용화·산업화 계획, 교육·지도·홍보 등 기술확산 계획, 특허·논문 등 지식재산권 확보계획, 그리고 추가연구, 타연구에 활용 계획 등에 대해 정리하였다. 자세한 내용은 제 5 장에 서술되어 있다.

2.22. 사용자지침서 작성 및 실용화시범사업 제시

본 과업에서 개발한 COMFARM에 대한 간략한 소개, 적용분야, 그리고 기능 등을 포함한 사용자지침서를 작성하였다. 사용자지침서는 COMFARM의 설치 방법, COMFARM 모듈 및 입력자료에 대한 설명, 그리고 모듈의 실행 방법 등을 포함한 COMFARM의 실행 방법을 포함하고 있다. 자세한 내용은 [첨부 II]에 서술되어 있다.

실용화시범사업을 제시를 위한 사전 작업으로 해외시험지구를 선정하여 기상/토양/농업/관개배수 현황을 조사하였다. 향후 COMFARM은 국외 지역 또한 적용이 가능할 것으로 사료된다.

2.23. 농촌 용수구역 관련 자료조사 및 분석

본 연구에서는 모니터링 대상지구 이외의 고평, 탐정, 고삼, 청천 저수지의 용수구역 관련 자료를 분석하였다. 해당지구의 용수구역 개황, 일반현황, 기후 및 기상 특성을 조사하였고, 저수지 상류유역 면적 및 토지이용, 유역경사, 유로연장, 관개면적, 만수위, 사수위, 홍수기 제한수위, 그리고 저수지 수위 등의 자료를 조사하였다. 구축된 자료는 저수지 물수지 해석 모형의 적용성 평가를 위해 이용되었다. 특히, 저수지 수위는 모형의 보정 및 검정을 위한 실측 자료로 이용되었다. 해당 내용은 <Water Balance Analysis of Agricultural Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation> 라는 주제로 SCI 학회지에 발표되었다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 2 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.24. 객체지향 모델링 기반 요소기술 개발

본 연구의 모의 요소인 상류 유출량, 상류 증발산량, 상류 배출부하량, 저수지 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량, 저수지 수면 강우량, 저수지 수면 증발량, 관개지구 배수량 등을 해석하는 객체 모듈을 구성/개발하였다. 또한, 사용자 정의 모듈을 개발하였으며, 이를 통해 사용자가 새로운 모듈을 추가·등록하여 기존 모듈과 연계할 수 있다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 6 절]에 서술되어 있다.

2.25. 모듈 기반의 플랫폼 개발

농촌용수 물순환 해석을 위한 객체 모듈 기반의 플랫폼을 개발하였다. 플랫폼은 모듈이 plug-in 되어 각 모듈간의 데이터 흐름과 전체적인 모듈 상호간의 관계가 한눈에 파악될 수 있도록 개발하였고, 여기에 등록된 모듈 외에도 추가적인 모듈을 개발하여 등록하

거나 또는 기존 모듈들의 교체 또는 새로운 논리로 작성된 모듈을 추가하여 서로의 결과 값을 비교할 수 있도록 구성하였다. [제 3 장 제 6절]에 상세히 서술되어 있다.

2.26. 모듈 조합을 통한 상호 호환성 및 편리성 분석

본 연구에서 개발한 요소 기술들을 객체 모듈로 구성 후 모듈을 조합하여 저수지 물수지를 해석하는 사용자 맞춤형 모형을 구성하였다. COMFARM 기반 플랫폼은 모듈간 상호 호환성 및 확장성 등을 잘 지원하고, 입력 및 결과 자료를 모듈 간에 자유롭게 사용할 수 있는 환경을 제공하여 모듈 간 연계/통합을 편리하게 지원하는 특징이 있다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 6절]에 상세히 서술되어 있다.

2.27. 한국농어촌공사 농촌용수 관련 시스템 연계를 통한 DB 인터페이스 구축

본 연구과제에서는 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템을 개발하였으며, 한국농어촌공사에서 운영하는 농촌용수종합정보시스템 (<http://rawris.ekr.or.kr/>) 등에 접속하여 저수지 수위 및 강우량 자료를 실시간으로 수집하는 DB 인터페이스를 구축하였다. 본 시스템을 적용하여 수백개 저수지에 대한 실시간 수위 자료를 획득하였다. 자료의 품질 조사 결과, 품질이 양호한 저수지는 44개소로 나타났으며, 해당 저수지 수위 자료를 본 보고서에 도시하였다. 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템은 [제 3 장 제 8 절]에, 그리고 수집한 저수지 수위 자료는 [제 3 장 제 9 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.28. 타기관 관련자료 연계 DB 인터페이스

본 연구에서 개발한 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템은 자료 입력, 자료 관리, 자료 분석, 그리고 자료 출력 모듈로 구성되어있다. 자료 입력 모듈은 한국농어촌공사 농촌용수관리시스템뿐만 아니라와 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 등에서 실시간으로 제공하는 자료를 선택적으로 읽은 다음, 기존의 개체관계도에 의해 구축한 데이터베이스에 입력한다. 자료 관리 모듈은 자료의 오류 등을 수정하여 자료의 품질을 관리한다. 자료 분석 모듈은 데이터베이스에 구축한 자료를 지점별, 시간별로 검색하는 기능과 그래프로 나타내는 기능이 있으며, 자료 출력 모듈은 구축한 자료를 지점별로 기술통계분석을 실시하여 보고서 형태로 출력한다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 8 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.29. Testbed 대상의 필요자료 구축

Testbed 대상 필요자료 구축을 위하여 자료의 품질 검사를 실시하였다. 이동지구의 용덕, 미산, 이동, 은산 강우관측소에서 수집된 강우자료의 품질을 확인하기 위하여 유역내에 위치한 국토교통부 관리 우량관측소의 강우자료와 상관성을 분석하였다. 또한, 용덕, 미산, 이동 저수지의 저수위자료와 농업용수 공급량 자료의 품질을 확인하기 위하여 이동지구의 물관리 특성을 반영하여 구축된 저수지 물수지 모형을 사용하여 모의한 결과를 실측자료와 비교하였다. 이동지구의 미산교, 묵방교, 덕성교, 재인교의 하천 유출자료의 품질을 확인하기 위하여 수정 Tank 모형을 사용하여 모의한 결과를 실측자료와 비교하였다. 동진지구는 저수지와 관개수로로 구분하여 사전조사를 실시하였다. 강우자료와 수위 자료로 나누어 데이터를 구축하였으며 지구 내 용수지선에서의 수위-유량 관계식을 산정하였으며, 지점 및 데이터의 특성을 고려하여 2012년부터 2013년까지의 화호, 대평,

감곡, 신용, 용성, 종신 등 총 6개 지선에서의 시점 및 말단 유량 비교 자료와 농업용수 공급량 비교 자료를 구축하였다. 시험포장 강우관측소의 강우자료의 품질을 확인하기 위하여 인근 기상청 자료와 상관성을 분석하였다. 또한 연구원 시험포장의 농업용수 공급량 자료의 품질을 평가하였다. 자세한 내용은 [제 3 장 제 9 절]에 상세히 서술되어 있다.

2.30. 개발된 모형의 적용 및 수정 보완

앞선 [나. 요소별 적용기술 선정: 복잡성 vs 편의성]과 [사. 해석 요소별 모의 기술 정립: 수치모형 or 경험공식 등]에서 기술하였듯이 개발된 모형은 4편의 석사학위 논문, 십수 편의 SCI/KCI 논문, 그리고 이외의 십수 편의 학술대회 발표에서 심사 및 질의응답을 거쳐 그 적용성이 평가되었다. 또한, 수반의 자문회의를 통해서 관련 분야 전문가의 조언을 얻었으며, 이를 반영하였다. 이 과정에서 모형은 개선되는 방향으로 수정/보완이 이루어졌다. 정립된 모의기법에 대한 자세 내용은 [제 3 장 제 1, 2, 3절]에 상세히 서술되어 있다.

제3절 관련분야에의 기여도

1. 관련분야 학술·기술발전 기여도

관련분야 학술·기술 발전도는 본 과업을 통해 도출된 학위논문과 학술지 논문에 게재된 내용을 중심으로 정리하였다. 다음의 내용 이외에도 학술·기술적으로 기여할 수 있는 부분은 무수히 많을 수 있을 것이다.

1.1 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 개발

본 과업에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM을 소개하였다. COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을 인터페이스를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었으며, COMFARM 시스템·환경 관리자·모형 관리자·자료 관리자·모형 래핑 관리자·그래픽 사용자 인터페이스 등 총 6개의 주요 구성 모듈로 이루어져 있다.

개별 요소 모듈은 입력 모듈, 모의 모듈, 그리고 출력 모듈로 분류할 수 있고, COMFARM 프로그램 화면에서는 모듈 간 연결을 통해 상호간 관계를 쉽게 파악할 수 있다. 사용자는 COMFARM을 통해 모의 요소와 이용 목적에 따라 기 구축된 모듈 또는 사용자 개발 모듈을 연결하여 사용자 맞춤형 모형을 설계할 수 있으며, 다양한 농촌용수 운영 시나리오를 적용할 수 있다.

또한, COMFARM은 응용프로그램, 모형, 그리고 컴포넌트가 분리된 상태에서 통합할 수 있어 모형의 재사용성을 높일 수 있고 확장성이 큰 특징을 띠고 있어 우리나라 농촌 지역의 물리적 특성 및 영농의 다양성·복잡성을 고려하면 그 적용성이 뛰어날 것으로 사료된다.

COMFARM은 유역단위 농촌용수의 체계적·과학적 해석 및 관리가 가능하며 판단하며, 이를 바탕으로 농촌유역 단위의 미래 농촌용수 예측은 물론 중장기 농촌용수 활용계획을 위한 정책 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가

본 연구에서는 Tank 모형과 SWAT 모형의 비교를 통한 Tank 모형의 적용성을 검토하기 위하여, 최적화 기법을 이용하여 Tank 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 보정 후 유출량을 비교하고 평가하였다. 본 연구결과 Tank 모형이 SWAT 모형과 비교하여 대체로 우수한 유출량 모의 결과를 보여주었으며, Tank 모형의 이용은 편의성을 유지하며 모의 능력이 떨어지지 않는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

1.3 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발

본 과업에서는 미계측 저수지 상류 유역의 유출량을 추정하기 위하여 개념적 강우-유출 모형인 Tank 모형의 매개변수 추정을 위한 회귀식을 개발하였다. 이는 매개변수의 제한범위를 고려하고 기존에 비해 장기간의 실측 자료를 이용하여 회귀식을 개발하였으며 그 적용성을 평가하였다. 또한, 대상 유역군의 유역경사 평균값과 표준편차를 고려하여 유역경사의 구간을 Case I, Case II에 따라 구분하고, 이를 바탕으로 회귀식을 개발한 뒤 그 적용성을 평가하였다.

본 연구에서 개발된 총 3 Case의 회귀식 (일반화된 회귀식, Case I의 구간에 대한 회귀식, 및 Case II 구간에 대한 회귀식 등)은 모두 기존에 제시된 회귀식보다 통계적으로 높은 정확도를 보였다. 특히, Case II 회귀식으로 산정된 매개변수로 모의한 총유출량은 실측 총유출량에 더 근접하게 모의됨으로써 향후 임의의 유역에 대한 장기유출량 모의 시 보다 신뢰성 높은 결과를 나타낼 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 용수공급량, 무효 방류량 등의 자료 획득에 어려움이 있는 미계측 저수지 유역의 유역관리, 설계 및 운영 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.4 미계측 유역 오염부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

본 연구에서는 미계측 유역의 오염부하량 추정을 위해, 수질 및 유량 자료를 확보하고 있는 수질오염총량제 실시유역 81개를 대상으로 LOADEST 회귀모형의 유역별 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석 및 인공신경망을 이용하여 토지이용, 유역면적, 유로연장 등 유역특성인자에 따른 매개변수 추정방법을 개발하였다. 또한, 개발된 방법을 시범 유역을 대상으로 적용성을 검토하였다.

본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법은 통계적 변량을 통해 실측치를 잘 반영하여 모의되는 것으로 나타났으며, 실측치 기반 매개변수에 의해 모의된 값과 유사한 모의 능력을 보이는 것으로 나타나, 오염부하량 모의에 있어 적용 가능할 것으로 사료된다. 향후, 본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법과 LOADEST 회귀모형은 실측자료가 확보되지 않은 농업용 저수지 소유역에 대한 오염부하량 모의와 정책결정을 위한 스크린 모델로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

1.5 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발

본 연구에서는 사용자의 편의성을 높이고 영농환경과 농업용 저수지 활용 목적 변화에 따른 현장 상황을 반영한 COMFARM 기반 사용자 맞춤형 모형인 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템 ARWS (Agricultural Reservoir Water supply simulation System)를 개발하였다. ARWS를 이용해 저수지 유입량, 농업용수 공급량, 저수지 수위를 모의하였으

며, 이를 HOMWRS의 모의 결과 및 실측 저수지 수위 자료와 비교하여 ARWS의 적용성을 분석하였다. 현장의 영농 상황을 고려하여 개발한 ARWS는 HOMWRS형에 비해 비교적 양호한 모의 결과를 나타내어 향후 농촌유역의 물순환 해석에 적용이 용이할 것으로 기대된다. 또한, 모의요소들은 각각의 독립된 모듈로 개발되어 모듈 구성에 따라 사용자에게 다양한 환경을 제공하고 신규 모듈을 추가를 통한 확장이 가능해 다양한 현장에서 이용이 가능할 것으로 기대된다.

1.6 연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의

본 연구에서는 관개효율의 연별 변화와 필요수량을 고려하여 추정된 용수 공급량이 실제 현장에서 공급되는 수량을 잘 모의하는지를 평가하였다. 대상지구로 이동저수지 지구를 선정하여, 2001~2009년 기간에 대한 실측 공급량 자료를 구축하였다. 관개효율, 물꼬 높이, 침투량 등 총 6개의 매개변수에 대해 민감도 분석, 보정 및 검정을 수행하였다. 민감도 분석 결과, 관개효율이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 관개효율은 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. 통계적 지표는 매우 우수하게 나타났다. 따라서 비록 농업용수 공급량은 인위적 요소이나, 적절한 매개변수 값을 사용하여 모의한다면 모의치가 실측치와 유사하게 모의될 수 있을 것이다. 하지만 대상지구의 실측 자료가 확보되지 않아 보정되지 않은 매개변수를 사용하는 경우 결과가 매우 안 좋을 수 있을 가능성이 나타났다. 따라서 장래 용수수요 추정, 용수수급 계획 등의 수자원 관리 계획 수립을 위해 관개지구 용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수의 선정은 매우 중요할 것으로 사료되며, 특히 관개효율은 연별로 보정하는 것을 추천하는 바이다.

본 연구 결과는 농업용수 공급량의 모의를 위한 전반적인 이해를 도우며, 향후 관개구역 단위의 합리적인 공급량 산정을 위한 실질적인 방법론 및 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

1.7 홍수기 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 고려한 농업용 저수지 물수지 해석 모형

본 연구에서는 농업용 저수지 물수지 모형을 농업용수 공급량 모형과 저수지 유입량 모형을 연계하여 개발하였다. 또한, 홍수기 제한수위와 연단위 관개효율 변화를 고려하는 새로운 저수지 운영규칙을 개발하였다. 매개변수 민감도 분석 결과, 관개효율 매개변수가 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 그리고 만수위 방류량의 변화에 가장 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대상저수지 4개소에 대해 연단위 관개효율 변화 및 홍수기 제한수위 운영을 고려하여 매개변수를 보정하였다. 모의치와 실측치를 비교한 결과, 통계 지표/산포도/시계열 그래프 등이 우수한 결과로 나타났다. 그러나 연단위 관개효율 변화를 고려하지 않는 경우와 홍수기 제한수위를 고려하지 않는 경우는 모의 결과가 실측 결과와 상당한 차이가 발생할 가능성이 나타났다.

아시아의 80 %가 관개로 이용되고 있고 그 수량의 50 % 이상이 논 관개용수로 이용되는 현황을 고려하면 본 연구에서 개발된 저수지 물수지 모형과 운영규칙은 한국을 포함한 여러 아시아 국가에서 유용하게 이용될 것으로 사료된다. 또한, 모형은 기후변화 등 다양한 여건변화를 고려하여 저수지 운영규칙을 재수립하는데 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

1.8 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발

본 연구에서는 복합영농 관개지구의 배수량을 추정하기 위하여 대상지구에 대하여 수문 모니터링을 실시하였으며, 복합영농 관개지구의 배수량을 모의하는 모형을 개발하였다. 본 모형은 농업용수 공급량 부모형, 논 광역 배수량 부모형, 시설재배지 유출량 부모형으로 구성되어 있으며, 논 포장 배수량, 용수로 배수량, 시설재배지 유출량을 구분하여 일별로 추정한다. 또한, 이동저수지 관개지구의 모니터링 자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였으며, 이로부터 대상지구 물수지를 분석하여 응용성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 관개지구의 배수량에 대한 이해를 넓히며, 배수량 추정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

1.9 관개지구의 농업용수 회귀 특성 분석

본 연구에서는 관개지구에서의 농업용수 회귀특성을 분석하기 위하여, 관개회귀수량을 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 자연회귀수량으로 구분하여 모니터링과 모델링 기법을 병행하여 산정하였다. 또한, 산정한 관개회귀수량 구성성분의 시기별 특성을 통계적인 방법을 이용하여 분석하였다. 본 연구와 선행연구결과를 포함한 농업용수 회귀율 분석 결과는 대부분 우리나라 수자원장기종합계획에서 제시하는 35%를 벗어나고 있었다. 따라서, 향후 합리적이며 경제적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 축적된 조사결과를 바탕으로 한 회귀율 자료가 물이용 계획에 반영되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구 결과는 관개회귀수량에 대한 전반적인 이해를 넓히며, 물이용 계획 수립을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대한다.

1.10 논에서의 수문 및 수질 모의 시스템 개발

기존에 개발된 논에서의 수문 및 수질 모형은 코드가 공개되지 않거나 시스템화 되지 않았으며, 논토양의 수리학적 특성과 질소 및 인 순환과 관련된 매개변수를 쉽게 구축할 수 없었다. 또 다른 제약조건으로는 입·출력변수가 복잡하고 다양하여 사용자가 이용하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서 사용자 맞춤형 전·후처리 컴포넌트가 모형에 추가될 필요가 있다.

본 연구에서는 논에서의 수문 및 수질 모의 시스템을 CREAMS-PADDY 모형을 수정하여 개발하였다. 수정 CREAMS-PADDY 모형의 전처리 컴포넌트는 기상 입력자료를 자동으로 구축할 수 있고, 매개변수 입력 편의성이 개선된 GUI 환경을 제공한다. 후처리 컴포넌트에서는 수정 CREAMS-PADDY 모형의 모의 결과인 논 포장 배수량, T-N 배출부하량, T-P 배출부하량 등을 도식적으로 보여주며, 실측치를 입력하면 통계 지표 또한 자동으로 계산한다.

1.11 농촌용수종합정보 자료관리 시스템 개발

본 연구에서는 농촌용수종합정보 자료관리 시스템을 개발하고 적용성을 검토하였다. 농촌용수종합정보 자료 관리 시스템은 자료 입력, 자료 관리, 자료 분석, 그리고 자료 출력 모듈로 구성되어 있다. 자료 입력 모듈은 모니터링 자료와 기상청, 국가수자원관리종합정보시스템 등에서 실시간으로 제공하는 자료를 선택적으로 읽은 다음, 기존의 개체관계도에 의해 구축한 데이터베이스에 입력하며, 자료 관리 모듈은 자료의 오류 등을 수정하여

자료의 품질을 관리한다. 자료 분석 모듈은 데이터베이스에 구축한 자료를 지점별, 시간별로 검색하는 기능과 그래프로 나타내는 기능을 가지며, 자료 출력 모듈은 구축한 자료를 지점별로 기술통계분석을 실시하여 보고서 형태로 출력한다.

본 연구에서 개발한 농촌용수종합정보 자료관리 시스템은 농촌용수 물순환 해석을 위한 효율적인 자료 관리를 할 수 있을 뿐만 아니라, 수문/수질 모델링에 있어 필요한 자료를 맞춤형으로 구성하여 편의를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

1.12 최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법

본 연구에서는 최적화 기법을 이용한 수문 모형의 매개변수 보정에 대한 이해를 돕기 위하여 유전자 알고리즘, SCE-UA, ACO, PSO 등의 최적화기법과 수문 모형의 최적화를 위해 이용되는 주요 목적함수 4개, 그리고 제약조건 설정방법에 대해 살펴보았다. 그리고 MATLAB 프로그램의 'Optimization Toolbox'를 이용하여 수문모형의 매개변수를 최적화하는 방법에 대해 수정 3단 TANK 모형을 중심으로 소개하였다. 본 연구에서 소개한 MATLAB 등의 프로그램을 활용하면 수문모형의 매개변수를 쉽게 보정할 수 있을 것이다.

2. 기술·사회·경제적 기대성과

2.1 기술적 측면

- ① 기후변화 대응 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석이 가능한 컴포넌트 기반의 종합적 농촌용수 해석 Framework 관련 원천기술 확보가 기대된다.
- ② 한국형 농촌용수 요소 해석 기법 관련 원천기술 수월성 확보를 통한 세계적인 기술력 선점 및 세계 최고수준의 전문인력 양성이 기대된다.
- ③ 지류지천 살리기 사업 등의 농촌지역 수자원과 하천의 관리를 위한 원천기술로서 농촌지역 물순환 해석기술이 제공될 것으로 기대된다.
- ④ 농촌지역 물환경 관련 원천기술의 우월성 확보를 통한 세계적인 농촌수자원 물순환 해석 기술력 선점 및 해외 농업 농촌 기술 지원과 수출에 핵심적인 기술로 역할이 기대된다.

2.2. 사회·경제적 측면

- ① 우리나라 농촌유역 특성 및 기후변화를 고려한 미래 농촌 수자원의 가뭄 및 홍수에 대한 전방위적 대처를 통한 국가 식량 안보 기반 구축 및 삶의 질 향상에 기여할 수 있다.
- ② 농촌용수의 하드웨어 기술 뿐 아니라 이를 종합적으로 해석하고 그 영향을 평가할 수 있는 COMFARM의 개발은 기상, 작물, 토양, 산림, 수문, 수질, 수리시설물 등 농촌용수 관련 주요 요소들에 대한 종합적인 해석이 가능하기 때문에 국내 및 국외에 판매 및 원조를 통한 경제성 측면 및 국제협력 위상 향상이 기대된다.
- ③ 기후변화 대응 농촌 수자원 종합해석기술 개발로 국제사회 노력을 선도할 수 있는 농촌녹색성장 원천기술 확보에 기여하고, 이에 따른 농업 생육환경, 농촌 수자원 및 환경, 농업경제 부분에 대한 신뢰성 있는 분석 기반을 조성함으로써 지속가능 농업 달성에 기여할 수 있다.

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

본 연구의 추진체계와 내용은 농촌용수 물순환 관련 모의 요소 해석기술을 개발 후 Test-Bed를 대상으로 적용성을 평가하고, 개발 요소기술을 객체지향 기반의 독립적인 모듈/컴포넌트로 구성하며, 농촌용수종합정보 자료관리시스템/전처리시스템 등을 구축하고, 모듈/컴포넌트 조합을 통한 농촌용수 물순환을 종합적으로 해석하는 모델링 Framework을 개발하는 것이다.

1차년도에서는 농촌용수 해석 요소 구성 및 농촌용수 모형 Framework 설계, 시·공간 자료 전처리 기술 조사, 농촌용수구역 Test-Bed 선정 및 모니터링 시스템 구축, 객체지향 모델링 기법 기반의 요소별 해석 모듈 개발 등을 실시하였다.

2차년도는 농촌용수 해석 요소 기술 및 Framework 연계 기술 개발, 농촌용수 종합정보 DB와 연계 기술 개발, 동적 모의 플랫폼 개발 등을 실시하였다. 또한, 1차년도에서 구축한 농촌용수 Test-Bed 모니터링 시스템을 운영하고, 수문/수질 자료를 수집하였으며, 수집된 자료를 데이터베이스화하였다.

3차년도는 객체기반 농촌용수 해석 플랫폼 구성 및 종합모형 개발, 모의 자료 후처리 및 의사결정 지원 기술 개발, 종합해석 모형의 농촌 용수구역에 대한 적용성 평가 및 실용화방안 제시, 시·공간 자료 및 실시간 모니터링 자료 DB 인터페이스 구축, 그리고 테스트베드 대상의 모형의 적용 및 보완 등을 실시하였다.

본 장에서는 위와 같은 3년간의 연구개발 결과에 따른 연구개발 성과를 정량적으로 산출하고, 본 연구과제로부터 산출된 결과물을 활용한 구체적인 성과활용 계획을 제시하고자 한다.

제1절 연구개발 성과

<표 5-1>은 연구기간 (2013년 8월 10일 - 2015년 8월 9일) 중 2015년 8월 현재 기준 지식재산권, 논문, 학술발표, 기술거래, 인력양성, 정책활용, 홍보전시, 그리고 기타 실적의 목표 및 달성도 등을 정리한 것이다. 본 연구기간의 연구계획서 상 정량적 성과 목표는 지식재산권의 출원 및 등록 각 2건, SCI 2편, 비SCI 6편, 기술거래 1건, 정책활용 2건, 홍보전시 2건 등이었다.

본 과업에서는 지식재산권 2건을 출원하였고, 현재 등록을 위한 심사 중이다. 논문은 SCI 3편 게재 확정, KCI 7편을 게재하여 정량적 성과 목표를 달성하였다. 기술거래는 특허가 등록 되는대로 실시할 예정이다. 정책제안 2건을 통해 정책활용 실적을 달성하였고, 학술지 기사 2편을 게재하여 홍보전시 실적을 모두 달성하였다. 이외에 연구계획서 상 목표에 설정되지 않았으나, 학술발표 13 편, 인력 양성 6명, 그리고 기타실적 2건을 본 연구 과제를 통해 달성할 수 있었다. 본 연구 과제를 통해 달성한 정량적 성과 목표에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

<표 5-1> 총 연구기간 동안의 연구개발 정량적 성과 목표 및 달성 현황

(단위 : 건수)

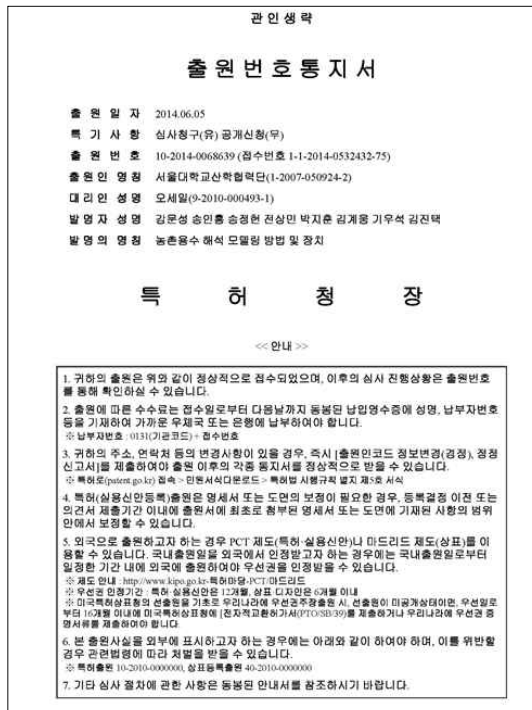
구 분	지식재산권		논문		학술 발표	기술 거래	사업화	기술 인증	인력 양성	정책 활용	홍보 전시	기타
	출원	등록	SCI	비 SCI								
최종목표				2	6		1			2	2	
1차년도	목표				1							
	실적				1	5			1			1
2차년도	목표	1	1	1	2							
	실적	1	1건 심사중		2	5			3		1	
3차년도	목표	1	1	1	3							
	실적	1	1건 심사중	3 + 1편심사중	4 + 1편심사중	3			2	2	1	1
소 계	목표	2	2	2	6		1			2	2	
	실적	2	2건 심사중	3 + 1편심사중	7 + 1편심사중	13	1건 예정		6	2	2	2

1. 지식재산권 출원

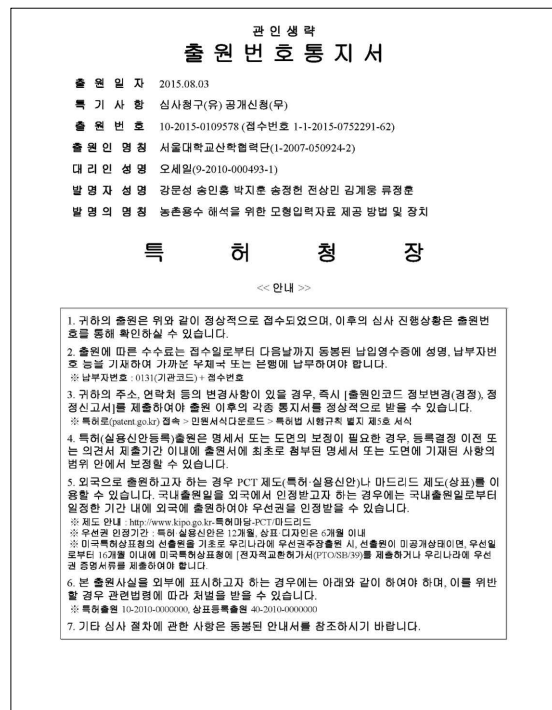
본 연구에서는 <표 5-2>와 (그림 5-1)과 같이 2건의 특허를 출원하였다. 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM을 개발하는 과정에서 <농촌용수해석 모델링 방법 및 장치> (출원번호: 10-2014-0068639)이 출원되었으며, 2015년 하반기에 등록될 것으로 예상하고 있다. 또한, 농촌용수 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하는 과정에서 <농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치> (출원번호: 10-2015-072291-62)가 출원되었으며, 2016년 하반기에 등록될 것으로 예상하고 있다. 각각의 지식재산권에 대한 자세한 내용/설명은 제 3 장 제 7 절과 제 3 장 제 8 절에 각각 상세히 서술되어 있다.

<표 5-2> 지식재산권 출원 실적

구 분	지식재산권 등 명칭	국 명	출원		
			출원인	출원일	출원번호
프로그램 개발	농촌용수해석 모델링 방법 및 장치	대한민국	강문성, 송인홍, 송정현, 전상민, 박지훈, 김계웅, 기우석, 김진택	2014. 06.05.	10-2014-0068639
프로그램 개발	농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치	대한민국	강문성, 송인홍, 박지훈, 송정현, 전상민, 김계웅, 류정훈	2015. 08.03.	10-2015-072291-62



(a) 농촌용수해석 모델링 방법 및 장치



(b) 농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치

(그림 5-1) 출원번호통지서

2. 논문 및 학술 발표 게재

본 연구 과제의 연구계획서 상 논문 게재 성과 목표는 SCI 2편, 그리고 KCI 6편이었으며, 본 연구기간동안의 달성 현황은 <표 5-3>, 그리고 (그림 5-2)와 같다.

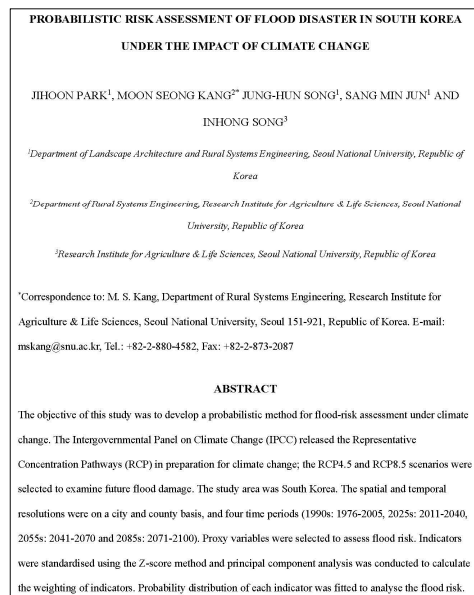
SCI 논문으로는 <PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT>, <PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE>, 그리고 <Water Balance Analysis in Agricultural Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation>가 SCI급 국제학술지에 게재 확정되어 SCI 성과 목표를 모두 달성하였으며, 현재 출판을 기다리는 중이다. 이외에 1편의 SCI 논문을 투고하여 2015년 8월 현재 기점에서 심사 중에 있다.

비SCI 논문은 <복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발>, <농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발>, <유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가>, <저수지 관개지구의 농업용수 회귀특성 분석>, <연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의>, <유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발>, <농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법 개발> 등을 한국농공학회논문집, 한국농촌계획학회논문집, 한국수자원학회논문집 등에 게재하여 비SCI 성과 목표를 모두 달성하였다. 이외에 1편의 논문을 국내 학술지에 투고하였으며, 2015년 8월 현재 심사 중에 있다.

본 연구의 계획서 상에는 학술발표 목표가 없었으나, 본 연구 내용을 홍보하고 연구 결과에 대해 국내·외 전문가들과 토의하기 위하여 학술발표대회에 참가하였다. 국외의 ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) 국제학술대회와 국내의 한국농공학회 및 한국수자원학회 학술발표대회 등에 참가하여, 총 13회의 학술발표 실적을 기록하였으며, 자세한 연구주제는 <표 5-4>와 같다.

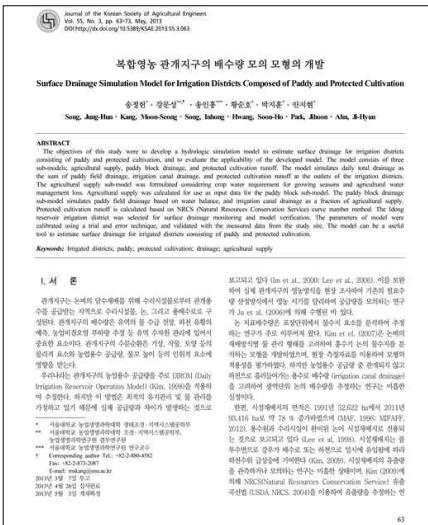


(a) PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT

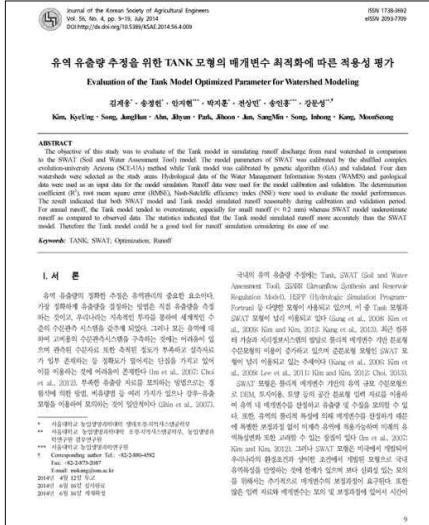


(b) PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE

(그림 5-2) 게재 확정된 SCI 논문



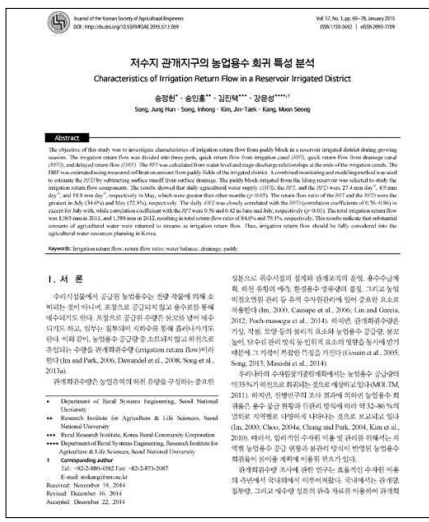
(a) 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발



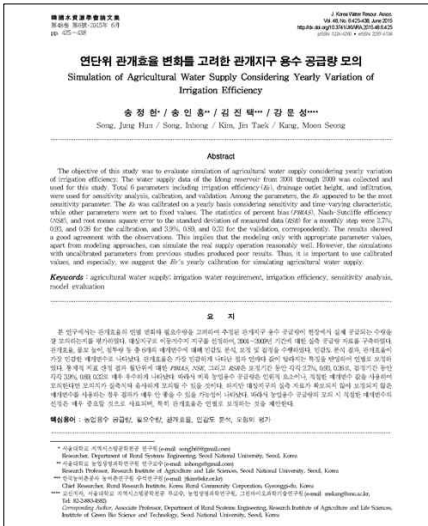
(b) 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발



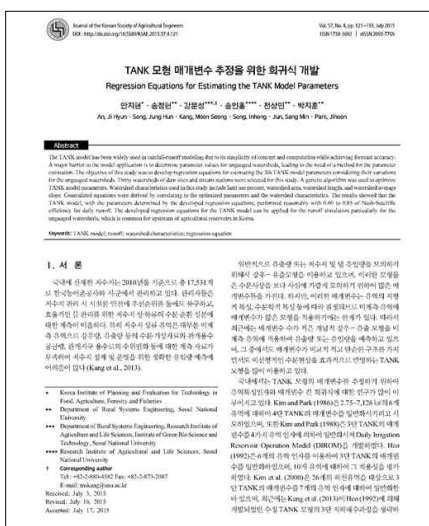
(c) 유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가



(d) 저수지 관개지구의 농업용수 회귀특성 분석



(e) 연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의



(f) 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발

(그림 5-3) 게재된 KCI 논문

<표 5-3> 학술논문게재 실적

일련 번호	제목	저자	학술지 명칭	게재 연월	권	호	SCI 구분
1	복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발	송정현, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 안지현	한국농공학회 논문집	2013.05	55	3	KCI
2	농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발	전상민, 강문성, 송인홍, 송정현, 박지훈, 기우석	한국농촌계획 학회논문집	2014.06	20	2	KCI
3	유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가	김계웅, 송정현, 안지현, 박지훈, 전상민, 송인홍, 강문성	한국농공학회 논문집	2014.07	56	4	KCI
4	저수지 관개지구의 농업용수 회귀특성 분석	송정현, 송인홍, 김진택, 강문성	한국농공학회 논문집	2015.01	57	1	KCI
5	연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의	송정현, 송인홍, 김진택, 강문성	한국수자원 학회논문집	2015.06	48	6	KCI
6	유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발	안지현, 송정현, 강문성, 송인홍, 전상민, 박지훈	한국농공학회	2015.07	57	4	KCI
7	농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법 개발	박지훈, 강문성, 송인홍, 송정현, 전상민, 김계웅, 류정훈	한국농공학회 논문집	2015.09	57	5	KCI
8	PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT	Jung Hun Song, Jeong Hoon Ryu, Jihoon Park, Sang Min Jun, Inhong Song, Jeongryeol Jang, Sang Min Kim, Moon Seong Kang	Irrigation and Drainage	2015.07	게재확정		SCIE
9	PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE	Jihoon Park, Moon Seong Kang, Jung-Hun Song, Sang Min Jun, Inhong Song	Irrigation and Drainage	2015.07	게재확정		SCIE
10	Water Balance Analysis in Agricultural Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation	Jung Hun Song, Moon Seong Kang, Inhong Song, Sang Min Jun	Journal of Irrigation and Drainage Engineering	2015.09.	게재확정		SCI
11	DEVELOPMENT OF A COMPONENT-BASED MODELING FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL WATER-RESOURCE MANAGEMENT	M. S. Kang, P. Srivastava, J. H. Song, J. Park, Y. Her, S. M. Kim, I. Song	Hydrological Processes	심사중			SCI
12	다중회귀분석을 이용한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정	김계웅, 송정현, 강문성	한국수자원 학회논문집	심사중			KCI

<표 5-4> 학술회의 발표 실적

일련 번호	제목	저자	학술회의 명칭	발표 연월	발표 장소
1	농촌용수 물순환 해석모형의 프레임워크 설계	강문성, 송인홍, 박지훈, 송정현, 김진택	한국농공학회 학술발표회	2012.09	천안상록 리조트컨벤션센터
2	객체지향 모델링 기법 기반의 농촌용수 물순환 해석 시스템 설계	송정현, 강문성, 송인홍, 박지훈, 안지현, 김진택	한국수자원학회 학술발표회	2013.05	호남대학교
3	미계측 유역의 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발	안지현, 강문성, 송인홍, 송정현	한국수자원학회 학술발표회	2013.05	호남대학교
4	Modeling surface drainage in paddy block area considering agricultural water supply	Jung Hun Song, Moon Seong Kang, Inhong Song, Jeong Ryeol Jang, Jin Taek Kim	ASABE annual meeting	2013.07	Kansas City
5	Modification of generalized method for the parameter estimation of the TANK model in ungauged watersheds	Ji Hyeon An, Moon Seong Kang, Inhong Song, Jung Hun Song, Jeong Ryeol Jang, Jin Taek Kim	ASABE annual meeting	2013.07	Kansas City
6	SWAT 모형과 TANK 모형을 이용한 댐 유역의 유출량 모의	김계웅, 강문성, 송인홍, 안지현, 박지훈, 송정현	한국농공학회 학술발표회	2013.10	청주 라마다 호텔
7	농촌용수구역 수문 해석기법의 개선	송정현, 강문성, 송인홍, 안지현, 전상민	한국농공학회 학술발표회	2013.10	청주 라마다 호텔
8	TANK 모형의 매개변수 최적화 기법 비교·분석	김계웅, 강문성, 송인홍, 송정현, 박지훈	한국수자원학회 학술발표회	2014.05	부경대학교
9	홍수기 제한수위를 고려한 농업용 저수지 물수지 분석	송정현, 강문성, 송인홍, 전상민	한국수자원학회 학술발표회	2014.05	부경대학교
10	The applicability of TANK Model for ungauged watersheds by comparing with SWAT Model	Kyeong Kim, Moon Seong Kang, Inhong Song, Ji Hyen Ahn, Jihoon Park, Jung Hun Song	ASABE annual meeting	2014.07	Montreal
11	저수지 하류의 유량 모의를 위한 하천망 모형의 보정 및 검증	송정현, 강문성, 송인홍	한국수자원학회 학술발표회	2015.05	대명리조트 델피노
12	농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 시스템 개발	박지훈, 강문성, 송인홍, 송정현	한국수자원학회 학술발표회	2015.05	대명리조트 델피노
13	유역특성을 고려한 오염부하량 모의 회귀식 개발	김계웅, 강문성, 송인홍, 송정현, 전상민	한국수자원학회 학술발표회	2015.05	대명리조트 델피노

3. 정책자료

본 연구과제를 수행하는 동안 2건의 정책제안을 국민신문고 (www.epeople.go.kr) 일반제안에 신청하였으며, 정책자료 성과 목표를 모두 달성하였다 <표 5-5>.

<표 5-5> 정책자료

일련 번호	제목 (신청번호 / 정책제안일)	제안자	주관부처
1	수자원장기종합계획에 적용되는 농업용수 회귀율 산정 개선 방안 제안 (1AB-1504-001019 / 2015.04.05.)	송정현, 강문성	국토 교통부
2	농업수자원 모델링 분야의 지속적/장기적 추진 및 지원 (1AB-1506-004592 / 2015.06.17.)	송정현, 강문성	농림축산 식품부

3.1 수자원장기종합계획에 적용되는 농업용수 회귀율 산정 개선 방안 제안

<수자원장기종합계획에 적용되는 농업용수 회귀율 산정 개선 방안 제안> (신청번호: 1AB-1504-001019)의 제안 내용은 다음과 같다. 우리나라의 국토교통부에서 발간하는 수자원장기종합계획에서는 외국 자료 등을 참조하여 농업용수 회귀율을 35%로 적용하고 있으나, 이 값은 우리나라 선행연구 조사 결과와 비교하면 상당한 괴리가 있다. 농업용수 회귀율은 수자원계획의 관점에서 관개조직의 운영, 용수수급계획, 하천 유황의 예측, 환경용수 방류량의 결정, 그리고 농업비점오염원 관리 등 유역 수자원관리에 있어 중요하게 영향을 미치게 때문에 현실성 있는 농업용수 회귀율이 우리나라의 수자원 이용 계획에 적용될 필요가 있다. 이에 지역별 기상 및 공간적 차이를 반영할 수 있도록 모델링 방식을 이용하여 지역별로 농업용수 회귀율을 산정 후 수자원장기종합계획에 이용하기를 제안하였다.

국토교통부 수자원정책국 수자원정책과로부터, “정확한 농업용수 회귀율의 산정을 위해서는 기상조건, 수원공별 물관리 방법의 변화, 생육시기별 침투량 등 종합적인 요인들을 고려한 장기적인 조사/분석 연구가 선행되어야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료됨에 따라 향후 지속적인 연구의 추진 방안을 검토할 계획”이라는 답변을 얻을 수 있었다.

3.2 농업수자원 모델링 분야의 지속적/장기적 추진 및 지원

<농업수자원 모델링 분야의 지속적/장기적 추진 및 지원> (신청번호: 1AB-1506-004592)에서 제안한 내용은 다음과 같다. 국내에서는 농림축산식품부의 농업수자원 모델링 분야 지원이 타 부처의 일반 수자원 모델링 지원에 비해 미흡한 실정이다. 이에 우리나라 농촌유역 물순환 요소 모의 및 의사결정지원을 위해 농업수자원 모델링 분야에 대한 지원이 지속적/장기적으로 추진될 필요성을 제기하였다.

농림축산식품부 농업정책국 식량정책관 농업기반과로부터, “농어촌정비법 제15조에 따라 농어촌용수의 효율적인 개발·이용 및 보전을 위한 합리화계획을 수립하여 개발여건과 지역특성을 감안한 지역별 10개년 개발계획을 추진하고 있으며, 관개효율 및 재

해대처 능력향상 등을 위한 농업용수관리 자동화사업(TM/TC), 전국 농업용수원의 수질현황 및 수질변화 등 수질관리를 위해 농업용수 수질조사 및 수질개선사업을 지속적으로 추진하고 있다”는 답변을 받았다.

4. 홍보실적

연구과제를 수행하는 중에 <표 5-6>과 (그림 5-4)와 같이 두 편의 학술기사를 한국농공학회의 [전원과 자원]매체에 기고하여 정량적 목표를 모두 달성하였다.

<수문 모형 매개변수 최적화 방법 소개>에서는 최적화 기법을 이용한 수문 모형의 매개변수 보정에 대한 이해를 돕기 위하여 주요 최적화 기법, 목적함수, 그리고 제약조건 설정방법 등에 대해 소개하였다. 그리고 본 연구과제를 통해 개발된 매개변수 최적화 실제 방법에 대해 수정 3단 TANK 모형을 중심으로 소개하였다.

<농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개>는 본 과제의 핵심 연구결과물인 COMFARM의 개발배경/개발현황/모듈구축방법/적용사례 등을 소개/홍보하는 기사이다.

<표 5-6> 홍보실적

일련번호	홍보유형	매체명	홍보내용	저자	홍보연월
1	학술기사	전원과 자원	최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개	송정현, 강문성, 정건희,	2014.06.
2	학술기사	전원과 자원	농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개	강문성, 송정현, 박지훈, 송인홍, 기우석, 김진택	2015.02.

최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개
- MATLAB 프로그램을 중심으로 -



송정현
서울대학교 / 박사과정
songjh55@gmail.com



정건희
조선대학교 / 조교수
gjhuc@jcu.ac.kr



강문성
서울대학교 / 부교수
mksang@seu.ac.kr

1. 서언

수문모형은 다양한 공간적 규모에 대한 수문순환을 설명하기 위해 개발되어 왔으며, 구동을 위해서는 매개변수에 대해 어느 정도의 사전 지식과 구간의 수문 순환 관측 데이터가 필요하다. 그러나 수문모형은 매개변수 보정 과정 중 최적화 기법을 이용하여 매개변수 보정하는 데 있어 최적화 기법 선택이 중요하다. 최적화 기법 선택은 목적함수의 형태, 제약조건, 그리고 목적함수의 비선형성에 따라 달라질 수 있다. 최적화 기법 선택을 돕기 위하여 본 연구에서는 수문모형의 매개변수 보정 문제를 최적화 기법 선택을 위한 프레임워크를 소개한다. 이 프레임워크는 수문모형의 매개변수 보정 문제를 최적화 기법 선택을 위한 프레임워크로 소개한다. 이 프레임워크는 수문모형의 매개변수 보정 문제를 최적화 기법 선택을 위한 프레임워크로 소개한다.

최적화 기법은 본 연구의 주요 내용이다. 이 프레임워크는 수문모형의 매개변수 보정 문제를 최적화 기법 선택을 위한 프레임워크로 소개한다.

10 - 전원과 자원, 제6권 제2호, 2014

농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개



송정현
서울대학교 / 박사과정
songjh55@gmail.com



송인홍
서울대학교 / 조교수
sinsong@seu.ac.kr



박지훈
서울대학교 / 조교수
gjhuc@jcu.ac.kr



송정현
서울대학교 / 조교수
sinsong@seu.ac.kr



기우석
서울대학교 / 조교수
kwoosuk@seu.ac.kr



김진택
서울대학교 / 조교수
jintak@seu.ac.kr

1. 서언

수문 순환과 관련된 물순환 체계모형은 다양한 공간적 규모와 다양한 용도의 연구에 대한 수문모형, 수리역학 기법, 그리고 수문모형 기법 및 이용 과정 등의 개발현황을 파악함으로써, 다양한 도시에 대한 수문 순환을 다양하게 개발하여 왔다. (Barnett et al., 2007; 강문성, 2008; 강문성 and 강문성 2009; 강문성 등, 2010). 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다. 그러나 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다. 그러나 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다.

물순환 체계모형의 주요 연구 분야는 수문모형, 수리역학 기법, 그리고 수문모형 기법 및 이용 과정 등의 개발현황을 파악함으로써, 다양한 도시에 대한 수문 순환을 다양하게 개발하여 왔다. (Barnett et al., 2007; 강문성, 2008; 강문성 and 강문성 2009; 강문성 등, 2010). 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다. 그러나 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다.

물순환 체계모형의 주요 연구 분야는 수문모형, 수리역학 기법, 그리고 수문모형 기법 및 이용 과정 등의 개발현황을 파악함으로써, 다양한 도시에 대한 수문 순환을 다양하게 개발하여 왔다. (Barnett et al., 2007; 강문성, 2008; 강문성 and 강문성 2009; 강문성 등, 2010). 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다. 그러나 이러한 물순환 체계모형은 다양한 용도의 연구에 활용되고 있다.

(a) 최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개

(b) 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개

(그림 5-4) 게재된 학술기사

5. 인력양성

본 연구과제에서는 <표 5-7>과 같이 석사 4명, 학사 2명의 인력이 양성되었다. 본 과제의 주관연구책임자인 서울대학교 강문성 교수의 지도하에 <복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의 모형의 개발>, <유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발>, <농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발>, <미계측 유역 오염 부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정>이라는 논문 주제로 공학석사 인력이 양성되었다. 이외에 2명의 공학사 인력 또한 본 과제를 통해 양성되었다.

<표 5-7> 인력양성 실적

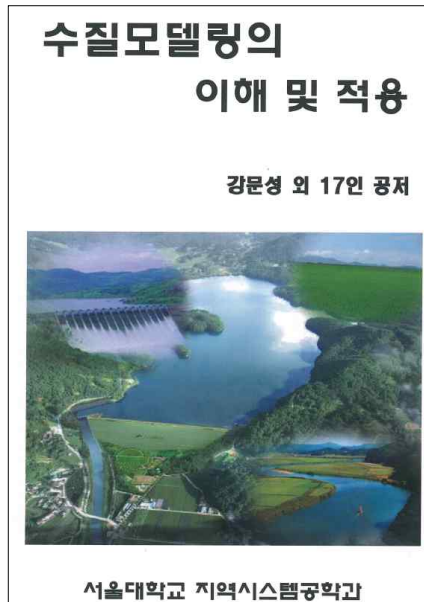
일련 번호	학위구분	논문제목	저자	지도교수	기관	졸업 연월
1	공학석사	복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의 모형의 개발	송정현	강문성	서울대학교	2013.02.
2	공학석사	유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발	안지현	강문성	서울대학교	2013.08.
2	공학석사	농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발	전상민	강문성	서울대학교	2014.02.
2	공학석사	미계측 유역 오염부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정	김계웅	강문성	서울대학교	2015.08.
2	공학사	SWAT 모형과 TANK 모형을 이용한 밀양댐유역의 장기유출량 모의	김계웅	강문성	서울대학교	2013.08.
2	공학사	오염부하량 추정을 위한 LOADEST 회귀모형 평가	조현수	강문성	서울대학교	2015.08.

6. 단행본 발간 실적

본 연구에서는 지역적 여건에 맞는 농촌용수 물순환 해석 모형 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework를 구축하기 위한 이론적 배경으로 국내외 물순환 해석 모형 및 요소 기술 개발 현황을 조사하였다. 본 연구를 통해 수집한 정보를 바탕으로, 관련 전공 연구자가 대표 수리/수문/수질 모형을 쉽게 접하고 적용할 수 있는 기회를 제공하기 위하여, 기본적인 이론과 자료 공유, 관련 사례 공유 등을 포함한 <수질모델링의 이해 및 적용> (도서출판 마루북스, ISBN 78-89-97259-02-1 93530)라는 단행본을 발간하였다 <표 5-8> (그림 5-5).

<표 5-8> 단행본 실적

일련 번호	구분	제목	저자	ISBN	출판 연월
1	학술서적	수질모델링의 이해 및 적용	강문성 외 17인 공저	78-89-97259-02-1 93530	2012.10.



(그림 5-5) 수질모델링의 이해 및 적용

7. 수상 실적

본 연구과제를 통해 게재된 논문 중 <복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발>은 연구의 우수성을 인정받아 한국농공학회 논문상 (농공학 제 2014-08호)을 수상하였다.

<표 5-9> 수상 실적

일련 번호	구분	수상명	수상 내용	수상 대상	수상일자	수상기관
1	학술 포상	한국농공학회 논문상	복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발	송정현	2014.10.	한국농공학회



(그림 5-6) 논문상 수상 실적

제 2 절 성과활용 계획

1. 실용화·산업화 계획

본 연구에서 개발된 COMFARM 관련 특허는 등록을 위한 심사 중에 있으며, 등록이 완료되면 실용화·산업화를 위한 기술이전을 계획하고 있다. 이를 통해 기존의 KOICA 사업 등 국제 협력에서 관개시설, 저수지 등의 설계 시공과 같이 하드웨어 위주에서 COMFARM을 통한 소프트웨어의 제공을 포함하는 종합 패키지 국제협력 사업 수출 및 기술 원조에 활용이 가능하다.

한국형 농촌용수 해석 모형의 개발을 통해 모델링 기법 및 적용성 등의 원천기술에 대한 지적재산권 확보 및 이를 통한 실용화·산업화가 기대된다. 외국 모형에 대한 수입 대체 효과뿐만 아니라 농촌용수의 이수·치수, 환경, 시설물 설계 기준 정립 및 계획 등의 정책 수립에 활용이 기대된다. 특히, COMFARM은 지역적 특성을 충분히 고려한 지역 특이적 문제해결에 부합하는 맞춤형 해석 요소기술을 제공함으로써, 용수구역 단위의 중장기 농촌용수 활용 계획 정책 수립에 활용이 가능할 것이다.

한편, 최근 들어 기후변화 등 여건변화에 따른 용수구역단위에서 발생하는 문제의 복잡성이 증가함에 따라 수문, 수질, 생태 등 다양한 요소의 종합적인 분석 및 평가가 필요하다. COMFARM은 이에 관한 문제 해결 방법을 제시할 수 있다. 또한, 본 연구 성과를 통해 기후변화 대응 유역 수문·수질 모형 개발 분야의 학술 교류나 관련 연구 분야의 활성화가 기대되며, 관련 분야의 기술 선점에 따른 국내에서 국제학술회의 개최 등을 통해 경제적 활성화가 기대된다.

우리나라 농촌지역 특성 및 기후변화를 고려한 수자원의 물수요분석 등의 가뭄 및 홍수 등에 대한 전방위적 대처를 통한 농촌수자원의 안정적인 공급과 국가 청정 수자원 확보를 위한 적정 농촌 물순환 해석 기술 제공 및 활용이 기대되며, 또한 가뭄 및 홍수 문제 해결을 통한 국가 예산의 효율성 증진이 기대된다.

또한, 효율적인 농업용수 관리방안 수립을 위한 요소기술 개발로 대체용수개발에 기여할 것으로 예상되고, 대체수자원 활용 시범사업을 통해, 정책적인 활용기반 조성에 기여할 수 있다.

이상을 달성하기 위해 실용화/산업화에 대한 지속적인 모니터링을 실시할 계획임

2. 기술확산 계획

2.1 교육·지도

개발한 농촌용수 물순환 관련 요소 기술 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework는 학부·대학원생 교육에 활용할 수 있고, 농어촌공사 등 현장실무자들의 지도에 활용할 수 있다.

본 연구과제를 통해 발간된 <수질 모델링의 이해 및 적용>은 수문·수리·수질 모형의 기본적 이론, 모형 적용 과정, 그리고 적용 사례 등을 수록하고 있으며, 대학원 석사과정의 참고교재로 활용될 수 있으며, 관개배수공학, 수문학, 수자원공학, 수공설계 등의 학부수업 실습교재로도 선별적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구개발 모델링 Framework의 경우 저수지 유입량 모의, 필요수량·농업용수 공

급량 모의, 저수지 물수지 요소 모의 등과 각 요소 간 연계 등을 실제로 수행할 수 있어 농업수자원 관련 전공 학부·대학원생들에게 농촌용수 물순환에 대한 실제적 이해를 제공하는 기회를 제공할 것이다. 더불어 모델링 Framework은 SCI/KCI 논문 등을 통해 검증된 최신 해석기법을 포함하고 있어, 물관리 의사결정권자는 상기 Framework를 통해 기존 모형에 비해 보다 합리적인 농촌용수 관리 시나리오에 따른 물순환 해석을 수행할 수 있을 것이다.

이상의 교육·지도 성과활용을 위해, 본 연구에서는 사용자지침서와 상기 내용 관련 동영상 제작하였다.

2.2 홍보

본 연구에서 개발된 컴포넌트 기반 모델링 Framework COMFARM의 기본적 이론, 모듈 및 입력자료에 대한 설명, 그리고 모듈의 실행 방법 등을 한국농공학회의 <전원과 자원>, 한국수자원학회의 <물과 미래> 등 학술잡지를 통해 홍보할 계획이다. 또한, 홍수기 제한수위 운영 및 연단위 관개효율 변화를 고려한 저수지 물수지 해석 등 본 연구에서 개발된 최신 해석기법 또한 홍보할 계획이다.

3. 지식재산권 확보계획

3.1 특허

컴포넌트기반 모델링 프레임워크 COMFARM을 개발하는 과정에서 2014년 6월에 <농촌용수해석 모델링 방법 및 장치> (출원번호: 10-2014-0068639)이 출원되었으며, 2016년 상반기에 등록될 것으로 기대하고 있으며, 등록 후 바로 기술 이전을 실시할 예정이다. 또한, 농촌용수 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하는 과정에서 개발된 <농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치> (출원번호: 10-2015-072291-62)가 출원되었으며, 2016년 하반기에 등록될 것으로 예상하고 있다.

3.2 논문

연구기간 동안 <Development of a Component-Based Modelling Framework for Agricultural Water-Resource Management>라는 주제로 SCI 논문이 투고되었으며, 2015년 8월 현재 기점에서 심사 중이다. 또한, <다중회귀분석을 이용한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정>이라는 주제가 국내 KCI 학술지에 투고되어 심사 중에 있다. 이외에 <Modeling Streamflow in an Agricultural Watershed Considering the Effects of Reservoir Outflows and Irrigation Return Flows> 및 <MATLAB/SIMULINK 기반 집중형 수문모형 설계기법 개발 및 적용성 분석>이라는 주제로 각각 SCI 및 KCI 학술지를 대상으로 원고 작성 중에 있다. 그밖에도 논문으로 계획 중인 주제가 다수 있으며, 국내외 다방면으로 게재할 것으로 예상하고 있다.

4. 타연구에 활용 계획

4.1 수자원 종합해석 및 의사결정지원 시스템 개발

사회 변화로 용수 수급이 복잡해져 기존 해석모형의 선진화가 필요하고, 나아가 시

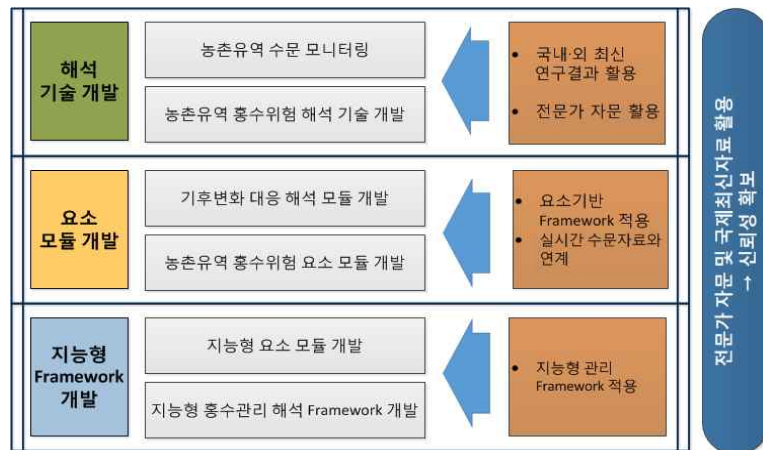
나리오 분석을 통한 의사결정 지원 수요도 증가하고 있다. 즉, 기후변화에 따라 용수 수급 형태가 변화하고 있고, 안정적인 수급을 위해서는 용수의 양과 질, 그리고 사회·환경적 측면을 고려한 종합적 수자원 해석 및 의사결정지원이 요구된다. 이에 지역 사회·환경 요소를 고려한 맞춤형 물순환 의사결정지원시스템의 개발이 필요하다. 이를 위해 물순환 관련 모의 요소 해석 기술 및 컴포넌트 기반 모델링 Framework의 활용성이 클 것으로 사료된다.

4.2 농촌유역 홍수관리를 위한 지능형 요소기반 해석 시스템 개발

본 과제에서 개발된 COMFARM의 주된 시간 단위는 일 단위였다. 하지만 COMFARM은 시간 간격에 구애받지 않으며 홍수사상에 대한 물순환 해석 또한 가능하다.

한편, 농촌유역의 홍수관리는 기후변화, 사회/경제적 변화, 유역환경변화 등의 복잡한 상호작용과 불확실성을 수반한 다양한 형태로 발현하고 있다. 특히, 생애주기가 수십 년에 이르는 농업생산기반 시설을 포함하는 농촌유역 홍수관리는 새로운 조건과 여건 변화를 고려하여 피드백이 가능한 지능형 홍수관리 및 운영 방식의 미래지향적 패러다임 변화가 요구된다. 또한, 농촌유역의 홍수관리는 외부 환경의 일회성 평가에 기반한 과거의 접근 방법에서 내외부의 복합적인 환경변화를 능동적으로 반영하기 위한 요소 모듈 방식의 지능형 홍수위험 관리로의 변화가 필요하다.

따라서 농촌유역을 대상으로 기후변화, 유역특성변화, 불확실성 요소, 사회/경제적 영향, 그리고 환경변화에 따른 영향 등의 대내외적 다양성과 복잡성을 반영하여 고려할 수 있는 요소 모듈 기반의 탄력적 홍수위험 관리 프레임워크를 개발이 필요하다. 이를 위해 본 과제의 주관연구기관인 서울대학교는 정부의 지원을 받아 “농촌유역 홍수관리를 위한 지능형 요소기반 해석 시스템 개발”이라는 연구과제를 2015년 6월부터 시작하였으며, 그 연구 과정에서 COMFARM이 활용될 것이다. (그림 5-7)은 지능형 홍수관리 해석 Framework 개발 추진전략을 보여주고 있다.



(그림 5-7) 지능형 홍수관리 해석 Framework 개발 추진전략

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서는 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복잡화에 따른 종합적인 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 및 모델링 Framework를 구축하기 위하여 해외과학기술정보를 수집하였다. 연구과정에서 해외의 과학기술정보를 수집하는 것은 중요한 연구 방법인 동시에 효과적인 연구수행을 위해서 꼭 필요한 과정이다. 본 연구에서는 국제학술대회에 참가하여 해외의 최신 연구 동향을 파악하였으며, 또한 동시에 본 연구에서 개발된 연구 결과를 해외에 발표/홍보하였다. 그리고 수많은 해외 보고서/단행본/논문 등을 참고하여 본 연구 개발을 위한 과학기술정보를 수집하였다.

본 장에서는 연구개발과정에서 참가한 국제학술대회를 간략히 정리하고 대표 해외과학기술관련 문헌들을 통해 수집한 정보를 정리하고자 한다. 본 연구에서는 연구 개발을 위해서 무수히 많은 해외과학기술정보를 참고하였으나, 본 장에서는 대표적인 해외 연구 문헌만을 수록하였다. 이외의 문헌 정보는 [제 2 장 국내외 기술개발 현황]과 [제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과]의 각 절에 수록된 연구내용 및 관련 참고문헌을 참조하기를 바란다.

제 1 절 국제학술대회

본 연구를 수행하는 기간 동안 1. 2013년 ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2. 2013년 PAWEES (International Society of Paddy and Water Environment Engineering), 3. 2014년 ASABE, 4. 2014년 ICID (International Commission on Irrigation and Drainage), 5. 2015년 세계물포럼 (7th World Water Forum 2014)에 참가하여 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 및 모델링 Framework과 관련된 최신 연구동향을 파악하고자 하였다.

1. 2013년 ASABE

2013년 ASABE는 Kansas City, Missouri에서 7월 21일부터 24일까지 4일간 진행되었다. ASABE는 아메리카 대륙을 중심으로 한 농공학 관련 학문동향을 파악할 수 있는 창구역할을 수행한다. 세션은 “MODELING HYDROLOGY AND POLLUTANT TRANSPORT”, “SOIL EROSION RESEARCH”, “AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT - IRRIGATION AND DRAINAGE”, “ADVANCES IN IRRIGATION MANAGEMENT” 등을 참가하였고, 최신 연구 동향을 파악하였다. 또한, 본 연구 결과물을 “Modeling Surface Drainage in Paddy Block Area Considering Agricultural Water Supply” 과 “Modification of Generalized Method for the Parameter Estimation of the TANK model in Ungauged Watersheds”라는 주제로 발표하였으며, 해외 전문가와 연구에 대한 질의응답 시간을 가졌다.

2. 2013년 PAWEES

2013 PAWEES는 대한민국 청주에서 10월 30일부터 11월 1일까지 개최되었다. 주제는

“Agricultural water and rural environment for the future”였으며, 일본/대만을 포함한 아시아지역의 농촌용수 관리 및 관련 연구동향에 대한 최신 정보를 수집할 수 있었다. ASABE는 북미 및 남미를 포함 전세계 국가가 참가한 학회였다면, PAWEES는 아시아 국가 위주로 주로 참가하다보니 국내와 지역적 조건이 비슷한 지역에서의 논 관개회귀수량을 포함한 관개지구 물수지 요소, 그리고 물 및 수질 관리 최신 기법을 수집할 수 있었다.

3. 2014년 ASABE

2014년 ASABE는 Quebec, Canada에서 7월 13일부터 16일까지 4일간 진행되었다. “Modeling impacts of residential and agricultural development and beneficial management practice scenarios on phosphorus dynamics in a small watershed”, “Yield and water use of guayule grown in Arizona”, “Effect of Tile Drain Depth, Spacing and Drain Water Management on Phosphorus Losses in Corn and Soybean Rotation”, “Estimation of Water Quality Characteristics at Ungauged Sites using Multiple Linear Regression and Canonical Correlation Analysis”, “Estimation of River Ice-cover Thickness using Bootstrap Artificial Neural Network Models” 등의 발표 세션에 참가하여 최신 연구 동향을 접하였으며, 본 연구와 관련된 부분에 대해 질문하여 토의를 가졌다. 본 연구 결과와 관련하여 “The Applicability of Tank Model for Ungauged Watersheds by Comparing with SWAT Model” 라는 주제로 발표하였다.

4. 2014년 ICID

ICID 제65차 총회는 대한민국 광주광역시에서 9월 14일부터 20일까지 7일간 진행되었다. 해당 총회는 62개국 1,345명이 참가하였으며, [기후변화와 농촌용수 확보]라는 주제로 개최되었기 때문에 본 연구와 밀접한 관련이 있었다. “Q. 58: How irrigation and drainage play an important role in climate change adaptation?”와 “Q. 59: How do irrigation and drainage interventions secure food production and livelihood for rural community?”라는 세션에 참가하였으며, 본 연구 결과물은 “Non-point Sources Pollution (NPS) and Best Management Practices” 세션에서 “PADDY FIELD MODELING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT”라는 주제로 발표되었다. 또한, IEC 등에 참가하였다. 본 연구의 발표 주제는 ICID 사무국에 의해 우수하다고 평가되었고, 해당 연구 내용은 Peer Review 이후 [Irrigation and Drainage]라는 SCIE 학회지에 수록될 수 있는 기회가 주어졌다.

5. 2015년 세계물포럼

세계물포럼은 물 분야에 있어 국제적으로 가장 큰 행사이다. 세계물위원회는 1997년 이후 매 3년마다 세계 물의 날 (World Water Day, 매년 3월 22일) 전후로 개최국과 더불어 국제회의를 열고 있으며, 정치적 과정(Political Process), 주제별 과정(Thematic Process), 지역별 과정(Regional Process)으로 크게 나뉘며, 전 세계 150개국 이상의 각료/국회의원/지자체장 등의 참여가 이루어진다. 주제별로 100여 개 이상의 회의가 민관산학 공동으로 펼쳐지는 복합적인 형태의 대규모 국제회의로, 2015년에는 대한민국 대구/경북

에서 4월 12일부터 17일까지 진행되었다. 본 포럼에서는 과학/기술적 연구내용뿐만 아니라 농촌용수 물관리 관련 의사결정자들의 국제적인 시각을 확인할 수 있었다.

제 2 절 해외 보고서 및 단행본

본 연구를 수행하는 과정에서 국외 대표적인 물순환 모형을 파악하고 각 모형의 모의 기작을 조사할 필요가 있었다. 이를 위해 본 연구에서는 대표 수문/수리/수질 모형의 보고서를 조사하였으며, 국외에서 발간되는 수문/수리/수질 관련 서적을 구입하여 모의 기작에 대한 조사를 수행하였다. 대표적인 내용을 다음 [1. 물순환 모형 보고서]과 [2. 모의 요소별 적용기법]에 정리하였다. 더 자세한 이론, 모형 적용 방법, 그리고 적용 사례 등은 본 과업을 통해서 발간된 [수질모델링의 이해 및 적용]이라는 단행본에 상세히 서술되어 있으니, 이를 참조하기를 바란다. 또한, 본 연구에서 적용한 모의 요소 기법은 [제 2 장 국내외 기술개발 현황]과 [제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과]를 참조하기를 바란다.

이외에 본 연구에서는 모델링 Framework 개발을 위해서 HarmonIT에서 발간한 “IT Frameworks Contract EVK1-CT-2001-00090” 보고서와 OpenMI 관련 보고서에 수록된 내용을 정리하였으며, 이를 [3. 모델링 Framework 보고서]에 수록하였다.

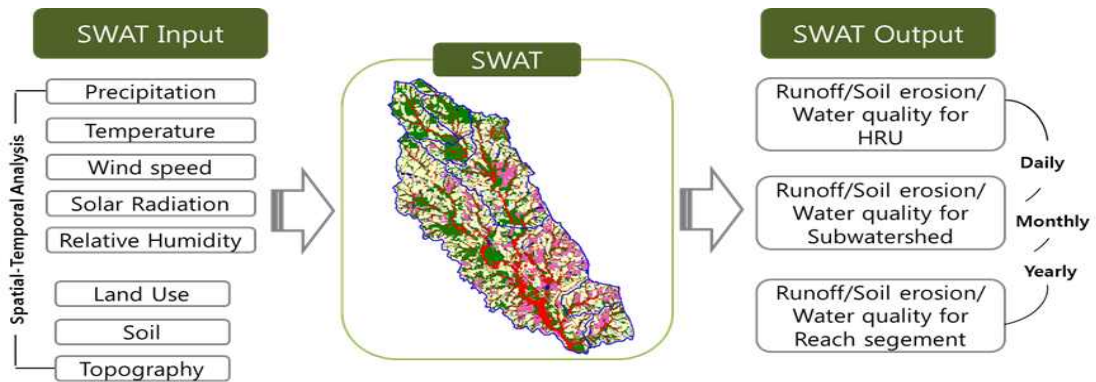
1. 물순환 모형 보고서

가. SWAT 모형

SWAT 모형은 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 유출량, 유사량의 모의 및 화학비료 등의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발되었다. SWAT은 CREAMS, GLEAMS, EPIC 모형을 기초로하여 개발되었으며, 현재의 SWAT 모형은 SWRRB(Wimulator for Water Resources in Rural Basins; 1985)을 발전시킨 형태이다.

SWAT 모형은 유역의 지형특성을 고려하여 대상유역을 몇 개의 소유역 (subbasin)으로 나누고, 소유역을 토지이용 및 토양 특성에 따라 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분화한다. 전체적인 모의는 유역부분과 수체부분으로 나누어 실시되는데 유역에서는 각 HRU에서 물수지식에 따라 강우량, 지하수로의 침투량, 증발산량 그리고 지표유출량을 산정한다. SWAT 모형에서 일별 지표면 유출량은 SCS 방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model (Sloan et al., 1983)을 이용하고 침투는 토층을 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 또한, 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다. 토양침식은 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의하여 계산되며, 인, 질소와 살충제 같은 유기성 화학물질의 이동량을 모의할 수 있다. 수체는 하천과 저수지를 의미하며 이 모듈에서는 유량, 퇴적물, 영양염류 그리고 유기성 화학물질의 반응 등이 고려된다. SWAT 모형의 입력자료는 GIS를 통해 작성되는 기상, 하도 추적, 지하수 등의 자료와 GIS와 수동 입력을 병행하여 작성되는 소유역 자료로 구분되며, 출력자료는 토양도와 토지이용도를 중첩시켜 만든 수문반응단위(HRU)별 출력자료와

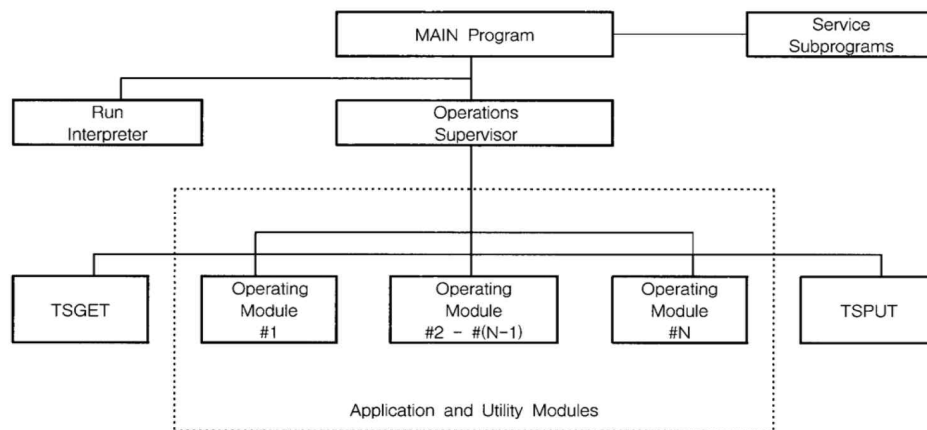
유역경계에 의해 구분된 소유역별 자료, 각 하도추적 구간별 결과치로 구분된다 (그림 6-1).



(그림 6-1) SWAT 모형의 구성

나. HSPF 모형

HSPF는 유역의 유출량과 수질을 모의하기 위해 설계된 종합적, 개념적, 연속적 유역 모형으로, 1966년 Crawford와 Linsley에 의해 개발된 스탠포드 유역 모형 (standford watershed model)에 기원을 두고 있다. 현재의 HSPF는 US EPA (United States Environmental Protection Agency)와 USGS (United States Geological Survey)에서 공동으로 개발한 모형으로, 기존의 HSP (Hydrocomp Simulation Programming), ARM (Agricultural Runoff Management), NPS (Nonpoint Source), SERATRA (Sediment and Radionuclides Transport) 모형에서 수행되는 다양한 모듈을 수정하여 보완한 모형이다. HSPF 모형의 구조는 (그림 6-2)와 같다.



(그림 6-2) HSPF 모형의 구조 (Bicknell et al., 1996)

HSPF 모형은 차단, 토양수분, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 적설심, 수분함량, 용설, 증발산, 지하수 충전, 용존산소, 생물학적 산소요구량, 온도, 농약, 대장균, 유사운송, 토립자 크기, 하천 홍수추적, 저수지 홍수추적, pH, 질소, 인, 식물성, 플랑크톤, 동물성 플랑크

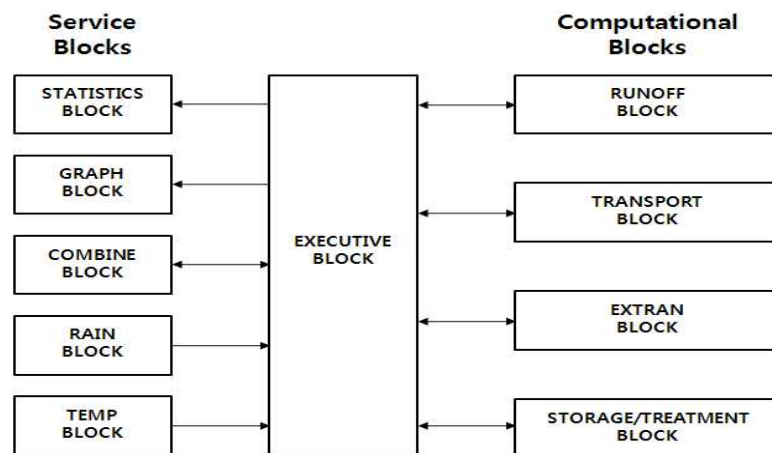
톤 등을 모의할 수 있으며 (Bicknell et al., 1996), 토지이용 변화, 저수지 운영, 점원 또는 비점원 오염 처리 대안 등에 대한 평가를 위해 이용되고 있다. WDM (Watershed Data Management)을 이용하여 입출력 자료의 전후처리 및 통계분석, 그래픽 지원 등을 제공하며 계산 시간 간격은 1분부터 1일까지 가능하고, 수분에서 수백년까지 기간에 대한 모의가 가능하며, 수 ha 크기의 시험포장 단위에서 160,000 km^2 의 Chesapeake만에 이르기까지 다양한 유역에 적용되었다 (김상민, 2004).

다. SWMM 모형

SWMM은 미국 EPA의 지원아래 Metcalf & Eddy사가 1971년에 개발한 최초의 도시유역의 유출량과 비점오염 부하량을 모의하는 모형 (Huber and Dickinson, 1988)이며, 그 뒤로 계속 모형 보완작업이 진행되어 현재까지 이르렀다.

SWMM은 호우에 의한 유출량과 수질을 예측하기 위해 강우주상도, 기상학적 입력자료, 소유역이나 하수 관로와 같은 시스템의 특성을 고려하여 실제 호우사상을 모의하도록 되어 있으며, 1981년에는 SWMM모형 내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 모형에 포함시켜 보완하였다 (Stahre et al., 1990).

SWMM 모형은 RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN, STORAGE/TREATMENT 등 4개의 computational 블록, 1개의 EXECUTIVE 블록 및 RAIN, TEMPERATURE, COMBINE, STATISTICS, GRAPH 등 5개의 service 블록으로 구성되어 있어 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.



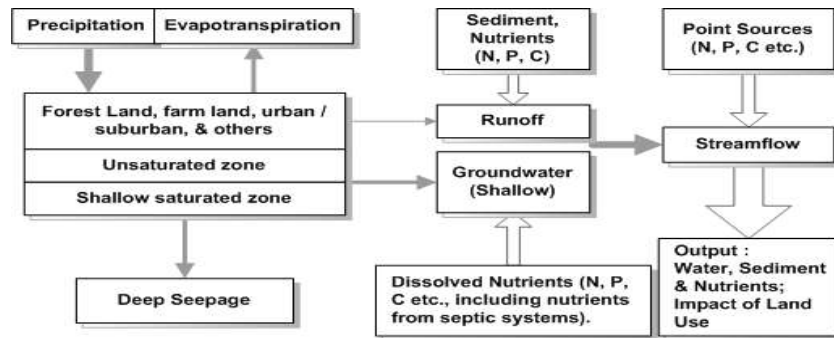
(그림 6-3) SWMM 블록 사이의 관계 (Huber and Dickinson, 1988)

라. GWLF 모형

GWLF 모형은 도시와 농촌, 산림의 복합 유역에 대한 점원 및 비점오염원의 영양 물질 부하량을 산정·평가하기 위한 목적으로 코넬대학의 Haith 등이 개발한 모형이다. 이 모형은 지표유출, 토양 유실, 도시지역의 쓸림에 의한 비점오염 부하량 등을 모의하는 분포형 모형이고, 지하수 모의 부분에 대하여 집중형 모형이다. 또한, 강우사상에 대하여 연속

적 모형 (continuous model)이며, 공간적으로 유역 모형이다.

GWLF 모형은 원단위법과 물리·화학적 모의 방법을 혼합하여 비점오염 부하를 모의하고, 입력자료의 수집이 용이한 지역은 물리·화학적 방법을 적용하며, 입력자료의 수집이 어려운 지역에 대해 원단위법을 적용하여 효율적으로 모델링을 할 수 있다 (황세운, 2006). (그림 6-4)는 GWLF 모형의 구조를 나타낸다.



(그림 6-4) GWLF 모형의 구조 (황세운, 2006)

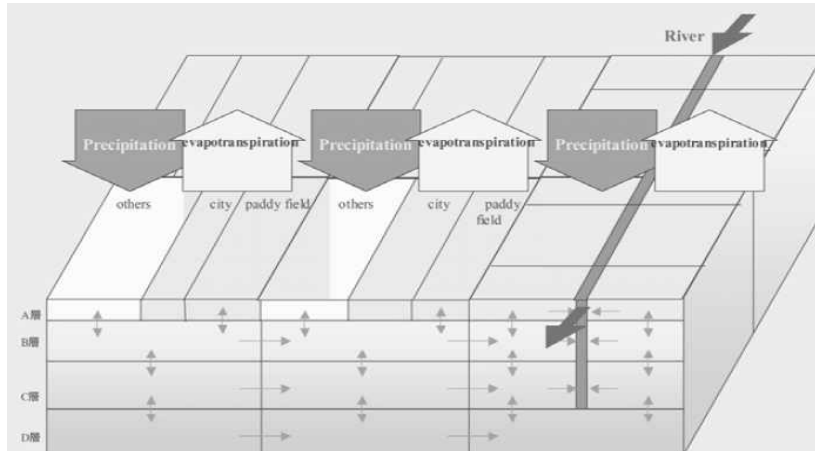
마. Tank 모형

Tank 모형은 Sugawara가 1961년 개발한 모형으로 유역을 여러 탱크의 선형시스템으로 가정하여 강우-유출 과정을 모형화 한 것으로 홍수유출이나 장기유출에 적용되고 있는 집중형 모형이다 (김현준, 2001). Tank 모형은 일반적으로 3~4단 탱크가 주로 이용되며, 상부탱크에서 강우와 증발산 및 지표유출을 모의하고, 하부탱크에서 지하수유출과정을 모의하며, 상부와 하부 및 중간탱크 사이의 물 이동을 통해 침투 및 중간유출 과정을 개념적으로 모의하는 방법을 취하고 있다 (김철겸과 김남원, 2012).

각 탱크는 2~3개의 유출공으로 구성되어 있으며, Sugawara (1972)는 일본의 유역에 4단 Tank 모형이 적합하고, 대유역의 경우에는 4~5개의 탱크가 적합하다고 제안하기도 하였다 (박승우, 1993; 김철겸과 김남원, 2012). 국내에서는 한상욱과 정중수 (1976)가 영산강의 장기유출에 적용한 이후로 많은 연구자들이 활발하게 사용하고 있다 (김현준, 2002). 김현영과 박승우 (1988)는 Tank 모형의 미계측 유역 적용을 위하여, 유역면적 및 토지이용비율 등을 이용하여 수정3단 Tank 모형의 각 매개변수에 대한 회귀식을 개발한 바 있다.

바. Hydro-BEAM 모형

Hydro-BEAM (Hydrological Basin Environmental Assessment Model)은 일본 교토대학 방재연구소 코지리 연구실에서 1998년부터 개발하였으며, 유역의 건전한 물순환을 평가하기 위하여 장기간의 유출량, 수질을 시공간적으로 파악하여 장래 토지이용변화 및 인공적 변화에 의한 유역의 영향평가를 하기 위하여 개발된 분포형 장기 유출 모형이다 (박진혁 등, 2003). Hydro-BEAM 모형은 DEM을 이용하여 격자의 흐름 이동 방향을 선정하고, 지표 유출은 운동파 이론 (kinematic wave method)에 의해 하도 추적 계산을 하며, 지하수 유출은 선형 저수지 방법 (linear storage method)을 이용하여 모의한다 (Kojiri and Kobayashi, 2003), (그림 6-5).

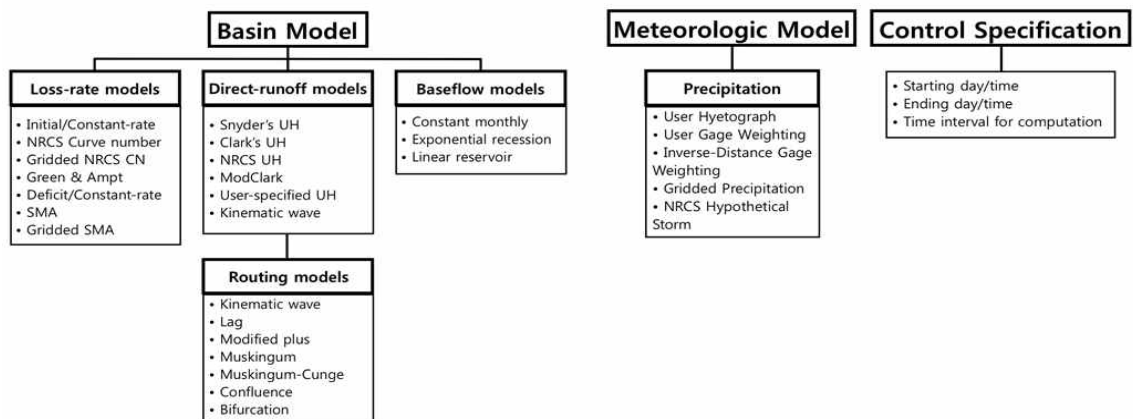


(그림 6-5) Hydro-BEAM 모형의 모식도 (Ikebuchi et al., 2006)

사. HEC-HMS 모형

HEC-HMS 모형은 강우-유출을 모의하기 위해 미 육군 공병단 수공학 센터에서 개발한 모형으로 대규모 유역의 수문해석뿐만 아니라 소규모 도시 유역 및 자연 유역의 유출 모의가 가능한 홍수사상 모형이다 (USACE, 2010).

HEC-HMS 모형은 유역에서의 유출과정을 손실량, 직접유출량, 기저유출, 하도구간 흐름 모의를 하는 4가지 모듈로 구성된 유역 모델 (basin model)과 강우, 증발산, 용설을 분석하는 기상 모델 (meteorologic model), HEC-HMS 모형의 실행을 위하여 모형의 모의시작시간과 모의 종료시간을 설정하여 주는 계산제어설정 (control specifications) 등으로 구성되어 있다 (성충현, 2004; 장승우, 2012; 황순호, 2012). (그림 6-6)은 HEC-HMS 모형에 포함되어 있는 각 모듈을 도식적으로 나타낸 것이다.



(그림 6-6) HEC-HMS모형의 세부 모듈 (성충현, 2004)

아. HEC-5 모형

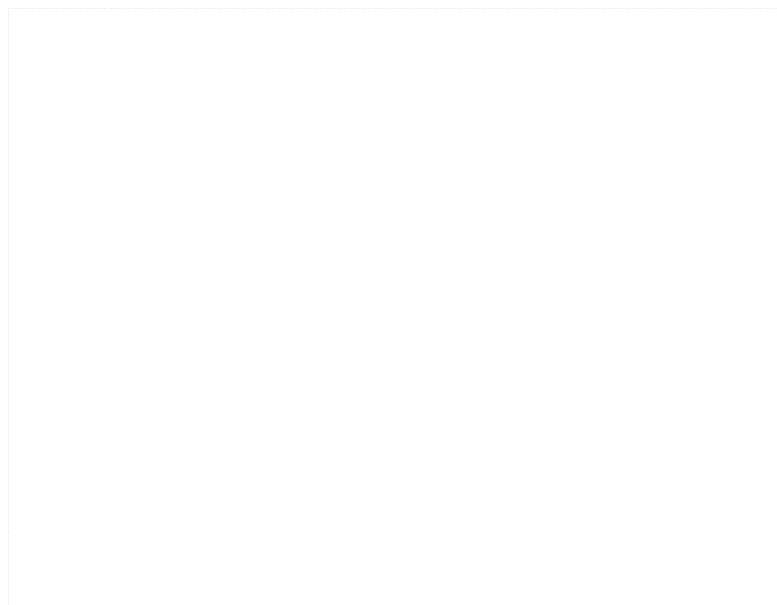
HEC-5 모형은 Bill S. Eichert에 의해 미 육군 공병단 수공학센터 (Hydrologic Engineering Center in US Army Corps of Engineers)에서 개발되었으며, 다목적 저수지 군 모의운영프로그램 중 가장 대표적인 모형이라 할 수 있다. 최초 버전은 1973년 5월에

단일홍수조절 모의 운영을 위해 개발되었고 이후에도 지속적으로 새로운 버전이 개발되어 1998년 10월에 Version 8이 개발되었다. HEC-5 모형은 각각의 저수지에 대한 홍수조절 및 필요 저수용량, 유역 내 유출의 공간적/시간적 분포에 대한 저수지 시스템의 영향, 저수지 시스템 운영을 위한 홍수 조절 및 이수 목적(발전 포함) 기준 평가, 최대홍수 조절 편익을 위한 기존의 저수지 및 건립 예정 저수지, 그리고 비구조적 포함하는 시스템의 모의 운영 등을 결정하는 데 주로 이용이 된다 (USACE, 1998; 황순호 2012).

자. HEC-RAS 모형

HEC-RAS 모형은 미 육군 공병단 수공학센터에서 개발된 HEC-2 모형의 후속 모델로 1995년 1.0 버전이 발표되어 2010년에 4.1 버전이 발표되었다. HEC-RAS 모형은 1차원 정상류 해석만이 가능했던 HEC-2 모형과 달리 부정류 해석과 더불어 유사 이송 모의 및 수온 모의까지 가능하다. GUI의 개발을 통해 사용자가 손쉽게 하천형상의 3차원 도시가 가능하며, 상류 및 사류 모의가 가능하고, 교량, 수문, 암거 등에 대한 부등류 및 부정류 해석도 처리할 수 있게 되었다 (USACE, 2010; 황순호 2012).

현재 ArcView GIS의 확장모듈을 이용하여, GIS로 처리된 자료를 활용해 지형 정보를 모형의 입력 자료로 사용할 수 있으며 HEC-RAS 이용의 어려움 중의 하나인 지형자료 구축 등에 도움이 되고 있으며, 이를 통해 하천 수위 모의뿐만 아니라 홍수 유입시 홍수 범람도 (flood inundation map) 작성에도 이용되고 있다 (황순호, 2012). (그림 6-7)은 HEC-RAS를 통한 하천 수위 모의 모식도를 나타낸 것이다.



(그림 6-7) HEC-RAS 모형의 하천 수위 모의 모식도 (황순호, 2012)

차. 유럽의 대표 모형

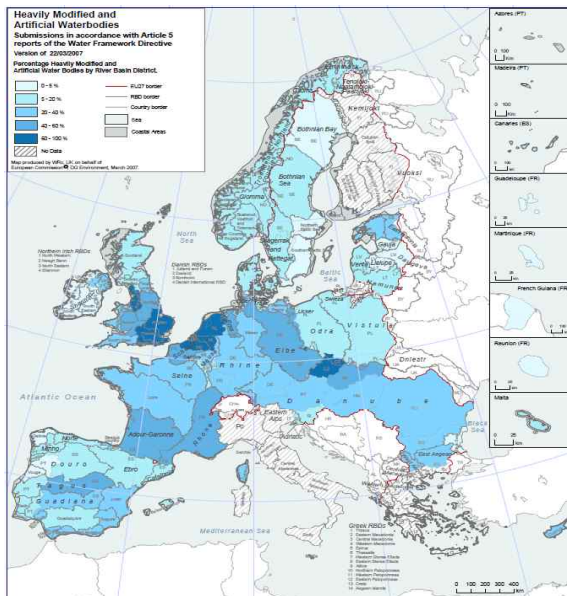
EU는 25개국이 참여하는 Water Framework Directive (WFD)를 통해 기후변화 대응 정책을 포함한 수자원 관리를 위한 기본 지침을 제공하고 있다. 현재 공식적인 수리·수질 모형이 결정되지는 않았고, 국가별로 각기 다른 모형을 제안하고 있다 (그림 6-8).

독일의 경우 3차원 수리·생태모형으로 GETAS를 제안하고 있으며, 이는 EU 과학기술 부서에서 개발하고 있는 모형으로 단순 수질모의를 넘어 생태까지도 모의 가능하도록 확장하고 있다. GETAS 모형은 LAKE 모형이 수리동역학적 모의를 담당하고, SALMO는 영양물질, 유기물, 저수위, 생물조절 등을 모의하며, 질소, 인, 식물성 및 동물성 플랑크톤, 조류, 산소 등 6개 수질변수의 모의가 가능하도록 개발되었다.

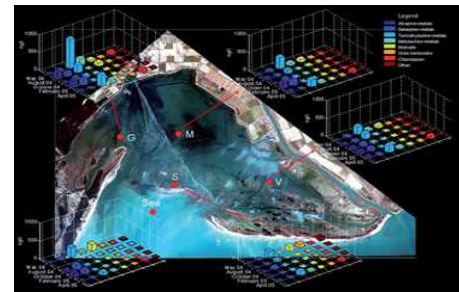
네덜란드는 아시아 개발은행의 예산지원으로 3차원 수리·수질모형인 DELFT3D을 개발하고 프랑스, 핀란드 등과 공동으로 다양한 프로젝트에 활용하고 있다.

오스트리아는 Environmental Software and Service (ESS)를 웹기반 실시간 자료관리 및 모델링이 가능한 시스템으로 개발하였으며, 수질, 대기, 오염원 등 자료를 실시간으로 수집하여 이를 예측모형과 연계하여 시나리오 분석을 통해 현안에 필요한 의사결정 지원 도구로 활용하고 있다.

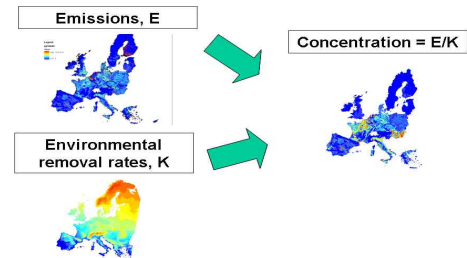
영국은 자국 수리연구소에서 개발한 3차원 수리·수질모형인 TELEMAC-3DWQ를 이용하여 영국의 지리·기후 특성을 반영한 홍수, 수질 및 생태계 평가를 수행하여 정책 수립을 위한 도구로 활용하고 있다.



(a) 대상국



(b) FATE



(c) 대유역 Screen Modeling

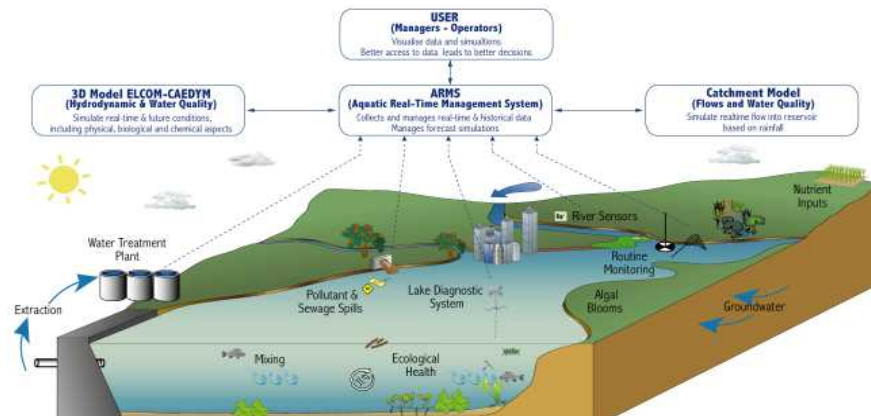
(그림 6-8) EU WFD의 개념 (EC Joint Research Centre)

카. 호주의 대표 모형

호주 CWR (Centre for Water Research)에서 개발한 ARMS (Aquatic Realtime Management System)은 수체의 실시간 모니터링을 통해 수자원을 관리하는 시스템으로써, 3차원 수리 및 수질모형을 통합하고, 실시간 관측 자료와 연계함으로써 홍수, 오염누출, 조류발생 등에 대응한 단기 의사 결정지원시스템으로 설계되었다 (안기홍 등, 2009). ARMS는 3차원 수리해석 모형으로 ELCOM (Estuary Lake and Coastal Ocean Model)과 수질 및 생태순환 모형인 CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model)이 시스템에 통합되어 수체의 동역학적 수질 모의가 가능하도록 개발되었으며, 호

주 시드니 유역관리청 (Sydney Catchment Authority)에서 저수지 실시간 수질감시 및 취수 시설 운영 지원시스템으로 활용되고 있다 (그림 6-9).

호주 국립과학원 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)은 Remote sensing 기술과 접목한 모형을 개발하여 정부 정책방향 수립에 활용하고 있으며, 생태계 모형인 Atlantis, SERM 등을 활용하여 생물다양성, 저수지 생태계 평가 및 예측을 수행하여, 생태계 건강성을 평가하고 수산 정책에 반영하고 있다.



(그림 6-9) 호주 ARMS 개념도 (HydroNumerics 홈페이지)

2. 모의요소별 적용 기법

가. 초과강우 또는 침투량 산정 기법

유역 수문 모델링에 있어서 첫 번째 단계는 초과 강우 즉 직접유출량을 산정하는 것이다. 여기에 나무나 식생에 의한 차단, 지면저류, 토양 침투량을 산정하고 물 수지를 고려하여 초과 강우를 산정하여 직접유출량을 결정하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 초과강우 또는 침투량을 산정하는 방법에 따라 SCS CN법, Richard, Philip, Smith & Parlange 법, Green & Ampt, Horton, Modified Holton-Overton, 초기 손실 및 일정침투율 등의 기법이 모델링에 이용되고 있다. 각 기법별로 적용되어 있는 모형 현황을 정리하면 다음의 <표 6-1>과 같다. 가장 널리 이용되는 방법은 SCS CN법으로 AGNPS, TR-55 등 많은 모형의 초과 강우 기법으로 널리 적용되고 있다 (강문성 등, 2012).

<표 6-1> 초과 강우 (or 침투량) 산정 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

SCS runoff curve number	Richard's equation	Philip's equation	Smith and Parlange procedure	Green and Ampt equation	Horton's equation	Modified Holton-Overton equation	Initial loss and constant rate
AGNPS	GSSHA (optional)	HSPF	DWSM (optional)	DR3M	MIKE URBAN (optional)	ANSWERS	HEC-HMS (optional)
DWSM HEC-HMS	MIKE SHE		KINEROS	GSSHA HEC-HMS (optional)	SWMM		MIKE URBAN
SEDIMOT III SWMM (optional) TR-55				PRMS SWMM (optional)			

(1) SCS Curve Number (CN) 방법

USDA SCS (Soil Conservation Service)에서 개발한 방법으로 지난 반세기 동안 가장 널리 이용되어온 방법이다 (Borah, 2011). 이 방법은 각 토양, 토지피복, 선행토양수분조건 등에 따른 다양한 유역에서의 유출곡선을 조사하여 각 특성에 따른 고유의 *CN*값을 DB로 정리하여 이로부터 직접유출량을 산정하는 식을 도출하고, 실제 모형에서도 이를 이용한다 (강문성 등, 2012). 이를 수식화하면 다음의 식 (6-1), (6-2)와 같다.

$$Q_r = \frac{(P - 0.2S_r)^2}{P + 0.8S_r} \quad (6-1)$$

$$S_r = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (6-2)$$

여기서, Q_r : 직접유출 또는 초과강우량 (mm), P : 강우량(mm), S_r : 최대 강우손실량 (mm), CN : 토양, 피복, 토양수분 조건에 따른 유출곡선번호

(2) Richard's Infiltration Equation

토양을 통한 물의 수직 거동을 표현하는 방정식으로 1931년에 Richard에 의해 Darcy의 법칙으로부터 유도되었다. Darcy법칙은 다공매질을 통한 유체의 흐름은 수리경사 (hydraulic gradient)에 비례하고, 이 비례 상수를 수리 전도율(hydraulic conductivity)로 나타내었다 (강문성 등, 2012). Richard 방정식을 수식으로 나타내면 식 (6-3)과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (6-3)$$

여기서, θ : 토양수분 (mm^3/mm^3), t : 시간(h), z : 지표로부터 하향 깊이 (mm), K : 수리전도율(mm/h), D : 토양수 확산도(mm^2/h)

(3) Philip's Infiltration Equation

1957년 Philip이 K 와 D 가 토양수분과 함께 변한다는 가정 하에 Richard 방정식을 보다 덜 제한적인 조건에서 해를 구하였다 (강문성 등, 2012). 이 식은 다양하게 표현되는데 이 중 대표적인 형식은 식 (6-4)와 같다.

$$f(t) = \frac{1}{2} S t^{(-1/2)} + A \quad (6-4)$$

여기서, $f(t)$: 토양 침투율 (mm/h), S : 토양 흡수율(Sortivity), A : 토양 특성 계수

(4) Smith & Parlange Infiltration Equation

이 방정식은 Richard 방정식으로부터 두 가지 가정 하에 지표 저류시간과 침투율 사이의 관계식을 도출한 방법이다. 자세한 방법은 Borah (2011)를 참조할 수 있다.

(5) Green and Ampt Equation

1911년 Green & Ampt는 토양 wetting front를 선형으로 가정하고, 균질한 토양 조건에 대해 Darcy법칙으로부터 침투방정식을 유도하였다. 방정식은 식 (6-5)와 같다.

$$f = K_x \left[1 + \frac{H_c(\theta_c - \theta_i)}{F} \right] \quad (6-5)$$

여기서, f : 침투율(mm/h), K_x : 포화 투수계수(mm/h), H_c : Capillary suction head (mm), θ_c : 유효 공극률, θ_i : 초기 토양 수분, F : 누적 침투량(mm)

이 밖의 Horton, Modified Holton-Overton 침투 방정식은 대부분의 수문 교과서에 수록이 되어 있고, 또한 Borah (2011)을 참조하면 상기 기법에 대해 보다 자세한 정보를 얻을 수 있다.

나. 지표 유출 및 하도 추적 기법

유체의 흐름을 표현하는 가장 기본적인 지배 방정식은 St. Venant 방정식으로 연속방정식(질량보전법칙)과 운동량보전법칙으로부터 유도된다. 지배 방정식은 크게 다섯 개의 항으로 구성되어 있는데, 국소 가속도, 이류 가속도, 압력, 중력, 마찰 항 등이다. 각 항목에 대한 고려 정도에 따라 모형의 정확성이 달라지고, 또한 모형의 복잡성도 고려 항목에 비례하여 증가한다. 고려항목의 개수에 따라 Dynamic wave, Diffusive wave, Kinematic wave 방정식으로 구분된다 (강문성 등, 2012). 이를 수식으로 표시하면 다음의 식 (6-6)과 같고, 고려 항목에 따른 모의 기법도 함께 보여주고 있다.

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{Local Acceleration}} + \underbrace{\frac{\partial \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right)}{\partial x}}_{\text{Advective Acceleration}} + \underbrace{gA \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{Pressure Force}} - \underbrace{gA(S_0 - S_f)}_{\text{Gravity \& Friction Force}} = 0 \quad (6-6)$$

					Kinematic wave
					Diffusive wave
					Dynamic wave

전체 다섯 항을 모두 고려하면 Dynamic wave 방정식이 되는데, 모든 항을 고려하는 만큼 모형의 정확도는 크다. 반면, 모형 구성의 복잡성이 크고, 또한 계산량이 많고 계산 결과의 수렴성에 있어서 안정성이 낮다. 따라서 이 기법은 유역단위에서는 거의 사용되지 않고 일부 사용되는 경우에도 극히 제한적인 범위에서 이용되고 있다.

Diffusive wave 방정식은 Dynamic wave 방정식에서 국부 가속 및 이류 가속항을 무시

하여 간편화시킨 모의기법이다. 압력항이 중력항과 마찰항으로 이루어진 간편식이 된다. 이 방정식 역시 수치적으로 해석이 되며, 이 기법을 이용하는 모형에는 CASC2D와 MIKE SHE 모형이 있다.

지배방정식을 가장 간편화시킨 모형이 바로 운동파방정식(Kinematic wave equation)이다. 이 기법은 상대적으로 적용에 안정성이 있으면서도 물리적 기작을 고려한다는 점에서 많은 모형에 이용되어 왔다. 이 기법의 운동량은 오직 중력항과 마찰항 만으로 표시되는데, 즉 에너지 경사(마찰항)는 바닥경사(중력항)와 같다는 것이다. 또한 이 모형은 많이 단순화되었기 때문에 엄밀해도 구할 수 있고, 수치적으로 해석될 수 있다는 것이 장점이다.

기본방정식을 기반으로 한 모형은 기본적으로 물리적인 기작을 고려해야 하기 때문에 모형으로 구축하는데 어느 정도의 제약이 따른다. 이를 극복하기 위해 물리적 기작을 고려하는 대신 연속방정식과 저류방정식을 연계한 물 수지를 통해 흐름추적을 하는 기법이 개발되었는데 이것이 바로 비선형저류방정식 (Nonlinear reservoir equation)과 Muskingum 방정식이다. 비선형저류방정식은 연속방정식과 물의 유량 결정을 위해 Manning공식을 결합하여, 수로나 지표 유출의 각 세그먼트를 하나의 저류조로 가정하고 물수지 분석하여 추적하는 개념이다. Muskingum 방정식은 비선형저류방정식에 있어서 수표면의 경사의 점증적인 변화를 고려할 수 있도록 약간의 변화를 구한 기법이다.

이보다 더 간단한 방법으로 경험식에 의한 하도 추적 방법이 있다. 여기에는 합리식, 단위도법, 합성단위도법, Snyder 단위도, SCS 단위도법(TR-55법) 등이 있으며, 그 이용의 편의성 때문에 널리 모형에 적용되어 왔다.

지금까지 살펴본 지표 및 하도 추적 기법을 적용한 모형에 대해 살펴보면 각각 <표 3-3>, <표 3-4>와 같다. Dynamic wave 기법을 적용한 모형에는 MIKE SHE와 SWMM 모형이 있고, 가장 널리 이용되는 모형인 HSPF 모형은 간단한 경험식에 기초한 추적기법을 적용하고 있다. 다음의 <표 6-2>, <표 6-3>의 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 형의 정도는 낮아지는 반면 모형의 간편성은 증가한다.

<표 6-2> 지표추적 (Overland routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

Diffusive wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : analytical solution	Nonlinear reservoir equations	Unit hydrograph	SCS unit hydrograph: TR-55 method (synthetic)	Time-area histogram	Rational formula or its modifications
GSSHA	HEC-HMS (optional)	DR3M	ANSWERS	HEC-HMS (optional synthetic: Snyder, SCS & Clark)	HEC-HMS (optional)	MIKE URBAN	AGNPS
MIKE SHE	KINEROS	DWSM	HSPF	MIKE URBAN (optional: Snyder)	MIKE URBAN (optional)		
	PRMS		MIKE URBAN (optional)	SEDIMOT III (synthetic: gamma function)	TR-55		
			SWMM				

<표 6-3> 하도추적(Channel routing) 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

Dynamic wave equations : numerical solution	Diffusive wave equations : numerical solution	Kinematic wave equations : numerical solution	Kinematic wave: analytical and shock-fitting solution	Muskingum method	Nonlinear reservoir equations	Rational formula or its modifications	Other methods
GSSHA (optional for mild channels)	GSSHA	DR3M	DWSM	HEC-HMS	ANSWERS	AGNPS (included in overland cells)	HSPF (outflow is a function of reach volume or demand)
MIKE URBAN	MIKE SHE	HEC-HMS (optional)		SEDIMOT III	HEC-HMS (Modified Plus : optional)		TR-55 (SCS unit hydro-graph or TR-55 method)
SWMM	MIKE URBAN (optional)	KINEROS MIKE URBAN (optional) PRMS SWMM (optional)					

다. 지하수 흐름 모의 기법

(1) Darcy 법칙

지하수 흐름 해석에 가장 기본 법칙은 Darcy의 법칙이다. 이를 3차원 수식으로 표현하면 식 (6-7)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6-7)$$

여기서, h : 정수두(m), K : 수리전도도(m/h), S_s : Specific storage(1/m), t : 시간(h), x, y, z : 거리 (m).

3차원 지하수 흐름 방정식은 엄밀해가 없고, 대략적인 수치해석을 통해 해를 구할 수 있다. 이 방정식에서 한 방향 흐름을 균일하게 가정하면 한 차원을 줄여 2차원 방정식으로 간소화할 수 있다. 간소화한 2차원 방정식은 식 (6-8)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (6-8)$$

여기서, H : 수두 (m), T : Transmissivity (m^2/h), S_s : 저류계수, W : Source 또는 sink (m/h)

(2) 운동파 저류방정식

운동파 저류방정식 (Kinematic storage equation)은 1983년 Sloan et al.에 의해 개발된 모형으로 식 (6-9)와 같다.

$$q_s = K_s \sin \alpha \frac{2V}{L(\theta_s - \theta_d)} \quad (6-9)$$

여기서, q_s : 지하수 흐름($m^3/s/m$), K_s : 포화투수계수(m/s), α : 불투수층 각도, L : 경사장 (m), θ_s : 포화 토양수분, θ_d : 포장용수량

(3) 기저유출 지수감수곡선

기저 유출 지수 감수 곡선은 Chow et al. (1988년) 유도한 식으로 식 (6-10)과 같다.

$$Q_b(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/k} \quad (6-10)$$

여기서, Q_b : 기저유출량(m^3/s), Q_0 : t_0 에서의 유량(m^3/sec), k : 지수감수상수

지금까지 지하수 흐름 해석에 이용되는 각 기법에 대해 간략하게 살펴보았다. 이러한 각기법이 적용되고 있는 모형 현황을 정리하면 다음의 <표 6-4>와 같다. 표에서 가장 왼쪽의 3차원 흐름해석 모형이 가능한 MIKE SHE가 가장 정도 및 복잡성이 높고, 오른쪽으로 갈수록 모형의 간편성이 증가한다. 통상 널리 이용되는 모형은 많은 경우 경험식 기반의 매우 간단한 모형을 이용하여 지하수 흐름을 해석하고 있는데, 여기에는 HSPF, SWMM모형이 포함되며, AGNPS모형은 지하수 흐름에 대해 고려하지 않았다.

<표 6-4> 지하수 흐름 해석 기법에 따른 모형 현황 (Borah, 2011)

3-D groundwater flow equation	2-D groundwater flow equation	Kinematic storage equation	Huggins and Monke drainage	Baseflow recession curve	Other methods	None
MIKE SHE	GSSHA	DWSM	ANSWERS	HEC-HMS	HSPF (empirical relations)	AGNPS
					MIKE URBAN (MOUSE RDI license: linear reservoir)	DR3M
					SWMM (mass balance and empirical fluxes)	KINEROS
						PRMS
						SEDIMOT III
						TR-55

라. 증발산량 모의 기법

증발산량을 산정하는 것은 효율적인 물관리와 수문기상학적 현상을 규명하는데 매우 중요하다. 증발산량 산정 기법은 많은 연구자들에 의해 제안되고 발전돼왔으며, 물수지방법, 공기동력학적 방법, 에너지와 공기동력항의 조합 방법, 복사에 기초한 방법 등으로 구분할 수 있다 (임창수, 2008). 또한 일부 모형의 경우 내부에서 증발산량을 산정하기보다 이용자가 산정하여 입력 자료로 요구하는 모형도 있는데, STORM, HSPF 모형이 여기에 속한다 (강문성 등, 2012).

증발산량 산정 기법은 Penman 식이 오래전에 개발되어 널리 이용되고 있다. 그 밖에 Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Hargreaves, Ritiche식, Braney-Criddle 등이 있다. 최근에는 수정 Penman식과 Penman-Monteith 방정식이 가장 널리 이용되고 있다. 미국 농무성에서 개발된 모형들은 Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Crop growth base Ritiche 기법 모두를 이용자가 선택하여 증발산량 산정에 이용할 수 있도록 하고 있고, 국내 모형인 HOMWRS는 Braney-Criddle식과 수정 Penman식을 선택 이용할 수 있도록 구성되어 있다.

(1) 수정 Penman

Penman법은 Penman이 열수지법과 공기역학적 방법인 Dalton법을 조합하여 제시한 것으로 습윤지대에서 기온, 습도, 일조시간, 증기압 및 풍속 등의 기상요소를 데이터로 이용하여 잠재 증발산량을 구하는 데 적합하다. Penman식은 일평균 기상 데이터를 사용하는 것이지만, 주간과 야간의 기상상태가 매우 다른 지역에서는 그 차를 계산상 고려할 필요가 있으며 (정하우 등, 2006), FAO의 보고서에서는 주간과 야간의 기상상태의 차이를 고려한 조정계수를 도입한 수정 Penman식이 이용되고 있다. 수정 Penman 식은 식 (6-11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 PET &= c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u_2)(e_{sa} - e_a) \right] \\
 R_n &= R_{ns} - R_{nl} \\
 f(u_2) &= 0.27 \left(1 + \frac{u_2}{100} \right)
 \end{aligned}
 \tag{6-11}$$

여기서 PET : 잠재 증발산량(mm/d), c : 조정계수, Δ : 온도~포화 증기압곡선의 기울기 (mb/°C), γ : 건습계정수(기온 15°C에서 0.66mb/°C), R_n : 순복사량(mm/d), $f(u_2)$: 풍속에 관계하는 함수, e_{sa} : 포화 수증기압(mb), e_a : 공기 중의 수증기압(mb), R_{ns} : 순단파 복사량 (mm/d), R_{nl} : 순장파 복사량(mm/d), u_2 : 지상 2m에서의 일 평균풍속(km/d)이다.

(2) Penman-Monteith

Penman-Monteith 식은 Penman 식에 공기역학적 저항 (aerodynamic resistance)과 기공저항 (stomatal resistance) 혹은 군락저항 (canopy resistance)의 개념을 도입한 것으로 Penman 식과는 달리 다양한 식생 및 수분이 적은 곳에서도 적용할 수 있다. UN 국제식

량농업기구 (FAO)는 기존에 사용되던 20여 개의 증발산량 공식을 검증한 후, 가장 합리적이고 세계적으로 사용할 수 있는 공식으로 식 (6-12)와 같은 FAO Penman-Monteith 식을 제시하였다 (정하우 등, 2006).

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{890\gamma U_2(e_a - e_d)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.339U_2)} \quad (6-12)$$

여기서 PET : 잠재 증발산량(mm/d), Δ : 포화 수증기압곡선 경사(kPa/°C), R_n : 순복사량(MJ/m²/d), U_2 : 2m 높이에서의 풍속(m/sec), γ : 건습계상수(kPa/°C), G : 토양열 유속밀도(soil heat flux density, MJ/m²/d), e_a : 포화 증기압(kPa), e_d : 실제증기압(kPa), $e_a - e_d$: 포화 증기압 결손량(kPa), T : 2m 높이에서의 일평균기온(°C)이다.

작물계수 K_c 는 대부분 작물의 종류 및 생육단계에 따라 다르고, 같은 작물의 경우에는 일반적으로 기후조건이나 위치에 대해서는 같다. K_c 는 기준작물 알팔파에 대하여 일반적으로 0.2~1.2의 범위를 나타낸다.

(3) Blaney-Criddle 법

이 방법은 기온, 주간시간(daytime hour) 및 작물계수로부터 잠재 증발산량을 산정하는 것으로 식 (6-13)과 같이 표현된다.

$$PET = kp(0.46t + 8.13) \quad (6-13)$$

여기서 PET : 잠재 증발산량(mm/d), k : 작물계수, p : 연 주간시간에 대한 월 주간시간의 백분율(%), t : 생육기별 평균기온(°C).

이 방법은 기온 기상자료밖에 얻어질 수 없는 경우에 주로 사용된다.

(4) Priestley-Taylor 법

Priestley와 Taylor(1972)는 지표면이 습한 경우 사용할 수 있는 증발산량 산정 식 (6-14)를 개발하였다. 이 식은 복사를 이용하는 방법 중 하나로 Penman 식을 단순화한 형태이다. Penman에의 제안된 공기동력항 영향이 미미하다는 가정 하에 개발되었기 때문에 기후조건이 습한 지역에 대해 이용된다. 에너지 요소는 계수는 일반적으로 $\alpha_{pet}=1.28$ 를 이용한다.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{net} - G) \quad (6-14)$$

여기서, λ : 기화점열(MJ/kg), E_0 : 잠재증발산(mm/d), α_{pet} : 계수, γ : 습도상수(kPa/°C), Δ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 de/dT (kPa/°C), H_{net} : 순복사량(MJm⁻²d⁻¹), G : 지

열 플럭스($MJm^{-2}d^{-1}$) 이다.

(5) Hargreaves Method

Hargreaves 방법은 California Davis 지역의 cool-season Alta fescue 잔디종에 대한 8년 동안의 침루계 자료로부터 유도되었으며 (Hargreaves, 1975), 이후 몇 번의 개선이 이루어졌다 (Hargreaves and Samani, 1982, 1985). FAO에 의해서 대기온도 자료만을 취득할 수 있는 경우에 대해 적용하도록 채택된 바 있으며 (Allen et al., 1998), 상대습도와 같은 지역적 특성을 고려하지 못하는 단점이 있으나, 계산이 간단하고 최소한의 기후자료를 이용하여 증발산량을 모의할 수 있는 장점이 있다 (식 (6-15), 임창수, 2008).

$$\lambda E_0 = 0.0023H_0(T_{mx} - T_{mn})^{0.5}(\overline{T_{av}} + 17.8) \quad (6-15)$$

여기서, λ : 기화잠열(MJ/kg), E_0 : 잠재증발산(mm/d), H_0 : 대기권밖 복사열($MJm^{-2}d^{-1}$), T_{mx} : 주어진 날의 최고기온($^{\circ}C$), T_{mn} : 주어진 날의 최저기온($^{\circ}C$), $\overline{T_{av}}$: 평균기온($^{\circ}C$)이다.

(6) Ritche 식

Ritche (1972)식은 식 (6-16)과 같다.

$$E_0 = \frac{1.28\Delta H_0}{\Delta + \gamma} \quad (6-16)$$

여기서, E_0 : 잠재증발산(mm/d), γ : 습도상수($kPa/^{\circ}C$), Δ : 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 $de/dT(kPa/^{\circ}C)$, H_0 : 총일사량($MJm^{-2}d^{-1}$)이다.

(7) Pan 증발량

Pan 증발량과 잠재증발산의 관계는 식 (6-17)과 같다.

$$E_0 = E_{pan} \times k_p \quad (6-17)$$

여기서, k_p : pan 계수, E_0 : 기준증발산량 (mm/day), E_{pan} : 소형 증발접시증발량 (mm/day) 이다.

잔디기준작물에 대해 여러 연구자들에 의해 pan 계수를 산정하는 식이 제시된바 있다 (Cuenca, 1989; Pereira et al., 1995; Allen et al., 1998). Allen et al. (1998)는 식 (6-18)과 같은 Pan 계수 산정식을 제안한 바 있다 (임창수, 2008).

$$k_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln(FET) + 0.1434\ln(RH_{mean}) - 0.00631[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean}) \quad (6-18)$$

여기서, u_2 : 지상 2m에서의 풍속(m/s), RH_{mean} : 평균상대습도 (%), FET : fetch 거리 (m) 이다.

(8) 증발산량 공식 비교

Allen et al. (1998)은 기존의 연구에서 추천했던 수정 Penman 공식의 과다 산정되는 점을 지적하고, 각 지역의 조건에 따른 적합한 방법을 비교, 검토하였다. FAO는 기존에 사용된 20여 종류의 증발산량 공식을 검토하였는데, 그 중 Penman-Monteith 공식이 건조 및 습윤 기후에서 비교적 정확하고 일정한 경향을 가지는 것으로 확인되었고 (유승환, 2006), 공식적으로 Penman-Monteith 식을 추천하고 있다 (Allen et al., 1998; 임창수, 2008). 현재 이 공식은 세계관개배수위원회 (ICID), 세계기상기구 (WMO) 등에서 추천하고 여러 연구에서 정확한 것으로 인정받고 있다 (유승환 등, 2006).

Penman-Monteith 식은 다른 증발산량 방법들에 비해서 몇 가지 장점을 지니고 있다. 첫째, Penman-Monteith 식은 물리적 근거에 기초하여 유도되어, 추가적인 매개변수의 보정 없이 전 세계에서 사용할 수 있다. 둘째, Penman-Monteith 식은 식의 유도과정과 사용방법이 잘 알려져 적용성이 있고, 전 세계에서 각종 증발산계(lysimeter)를 이용하여 측정된 증발산량과 비교 검증된 모형이다 (Allen et al., 1994; 임창수, 2008). 셋째, Penman-Monteith 공식을 이용하는 경우 식생 및 토양요소의 차이를 고려하지 않으므로 서로 다른 지역 또는 서로 다른 기간에 산정된 잠재증발산량을 비교 검토할 수 있다 (임창수, 2008).

Penman-Monteith 공식은 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등의 구체적인 기상요소 자료를 필요로 하고, 또한 식을 적용하는 과정에서 복잡한 단위변환이나 계산이 필요한 단점이 있다 (Irmak et al., 2003, 임창수, 2008). 하지만, 우리나라는 전체 77개의 측후소에서 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 강우량 등을 일별로 수집하고 있으며, 1974년부터 기상 관측이 이루어지는 측후소가 54개인 것을 고려하면 Penman-Monteith 공식의 적용은 무리가 없을 것이라 사료된다.

한편, 작물의 실제증발산량을 산정하기 위해서는 작물별 작물계수를 필요로 한다. 우리나라는 Penman-Monteith 공식 적용 이전에 FAO 수정 Penman식을 주로 이용하였다. FAO 수정 Penman 식의 작물계수는 밭작물을 대상으로 1987년부터 1990년까지 4개년 동안에 수원 지방에서 고추, 콩, 배추 등의 토양수분량 변화량 측정치를 근거로 산정된 바 있으며 (농림수산부, 1990), 1995년부터 1997년까지 3개년 동안 논벼에 대하여 수원과 대구 지역에 라이시미터를 이용하여 실제 증발산량을 산정하여 논벼의 작물계수가 산정된 바 있다 (농림부, 1997). 작물계수를 새로 산정하는 것은 장기간에 걸쳐 실험이 이루어져야 하기 때문에 시간적, 경제적으로 한계가 있으므로 Penman-Monteith 공식의 적용이 어려운 지역인 경우 FAO 수정 Penman식의 적용이 합리적이라 할 수 있다. 본 연구 모형의 증발산량 부분은 대표적인 증발량식인 Penman-Monteith 공식, 수정 Penman 식, Blaney-Criddle 중 사용자에 따라 선택할 수 있도록 구성되어 있으며 Penman-Monteith 식을 추천하고 있다.

마. 유사량 산정 기법

유사량 산정 기법에 가장 일반적으로 사용되는 기법은 USLE (Universal Soil Loss Equation) 기법이다. 이 방법은 지형, 토양, 강우 특성, 식생, 관리 인자 등을 고려하여 장기간 년평균 유사량을 산정하는 기법이다. 이 식을 기반으로 수정 USLE의 강우에너지

인자를 유출에너지 인자로 수정한 MUSLE식이 개발되고 (Williams, 1975), USLE개발 DB의 전반적인 업데이트 및 발전된 각 인자관련 이론 등을 종합적으로 적용하여 USLE 식을 전반적으로 보완한 RUSLE 등이 개발되었다.

이 밖에 유사의 이탈, 세굴, 이송, 퇴적 등 토립자 거동의 각 기작을 경험식으로 규명하 공 이를 모델에 적용하는 detach-washoff-deposit-transport 기법도 유사 모의에 이용되는 기법이다.

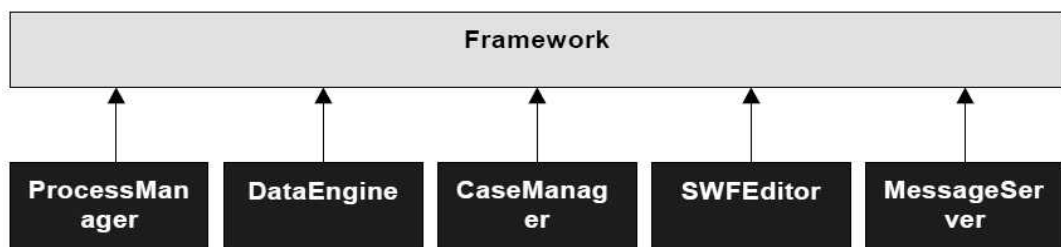
각 유사 산정 기법별로 적용된 모형의 현황을 살펴보면 그림 3과 같다. 전반적으로 오래된 모형은 USLE를 많이 사용하고, 농촌유역에서 가장 널리 이용되는 SWAT모형의 경우 수정 USLE식을 이용하고 있다. 토립자 거동 기작을 이용하는 모형에 HSPRF, CREAMS, KINEROS 등 다수의 모형들이 조사되었다.

3. 모델링 Framework 보고서

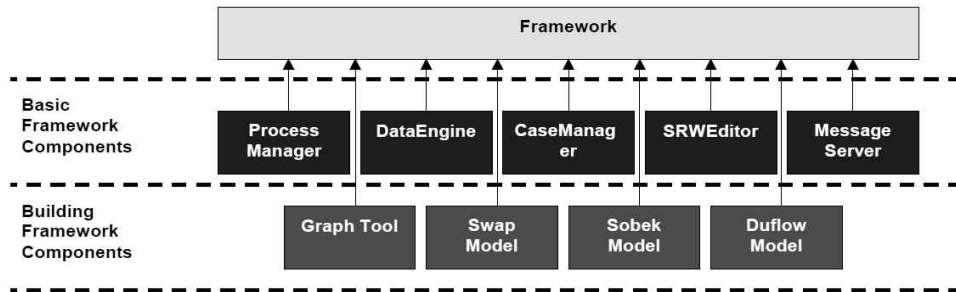
국외에서 최근에 개발된 객체기반 Framework은 GF (Generic Framework), OMS (Object Modelling System), ICMS (Integrated Catchment Modelling System), TIME (The Invisible Modelling Environment), OpenMI (Open Modelling Interface) 등이 있으며, 이들은 지속적인 개발 및 적용이 이루어지고 있다.

가. GF

Generic Framework (GF)는 모형을 연계하고 의사결정을 지원하기 위한 개방형 Framework로, 네덜란드의 RIZA, STOWA, Alterra, RIVM 사가 연합하여 개발하였다. 모형의 주된 기능은 통합유역모델링과 환경모델링과 관련된 모형을 메모리 기반의 하나의 시간 간격 (time-step)으로 연결하고, 모형간의 피드백 루프를 설정하는 것이다. GF Framework는 ProcessManager, DataEngine, SRW-Editor, CaseManager, MessageServer의 총 5개의 컴포넌트로 구성되어 있다. ProcessManager는 시뮬레이션을 시작 및 중지하고 계산과정을 결정한다. DataEngine은 모형과 일반적 도구간의 자료 교환과 관리를 담당한다. SRW-Editor는 모형내의 Point를 연결한다. CaseManager는 기존 연구 사례를 보여주고, 사용자가 새로운 사례를 선택하거나 GF를 이용하여 새로운 사례를 만들도록 지원한다. MessageServer는 사용자에게 메시지를 보내는 기능을 제공하며 Framework 컴포넌트로부터 받은 모든 메시지를 기록한다. (그림 6-10)은 GF Framework의 구성을 나타내고 있으며, (그림 6-11)은 추가 컴포넌트를 이용하여 GF Framework를 구성하는 것을 보여주고 있다.



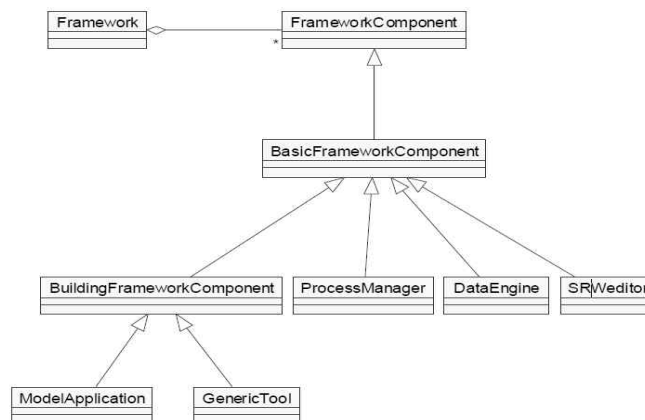
(그림 6-10) GF Framework의 구성 (Tacke et al., 2001)



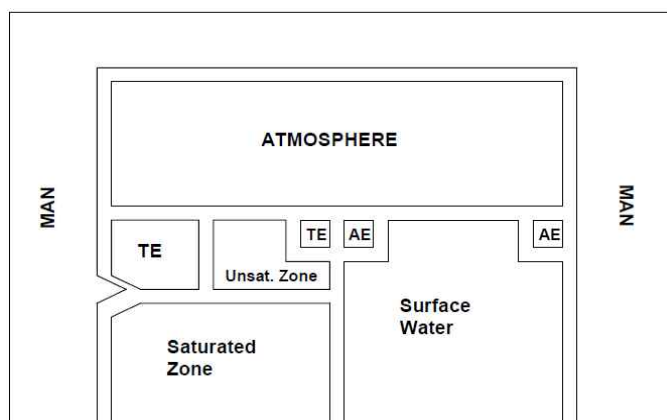
(그림 6-11) 추가 컴포넌트를 이용한 GF Framework (Tacke et al., 2001)

(그림 6-11)의 구조를 클래스를 이용하여 나타내면 (그림 6-12)와 같다. GF에서 제공하는 기본적인 컴포넌트를 이용하여 Framework 컴포넌트 (Framework Component)를 구성하고 이를 이용하여 전체적인 Framework를 생성한다.

GF Framework는 물리적 도메인, 모델링 및 모의, 개발환경으로 나눌 수 있다. 물리적 도메인은 모형을 수행하기 위한 완전한 설명을 제시하는 것이 목적이며, 모델링 및 모의는 모형 컴포넌트를 결합하기 위해 필요한 모형 요소와 연결자의 개념을 설명한다. 개발환경은 모형 프로그램과 일반적인 도구를 정의한다. (그림 6-13)은 GF의 물리적 도메인을 나타내고 있다.

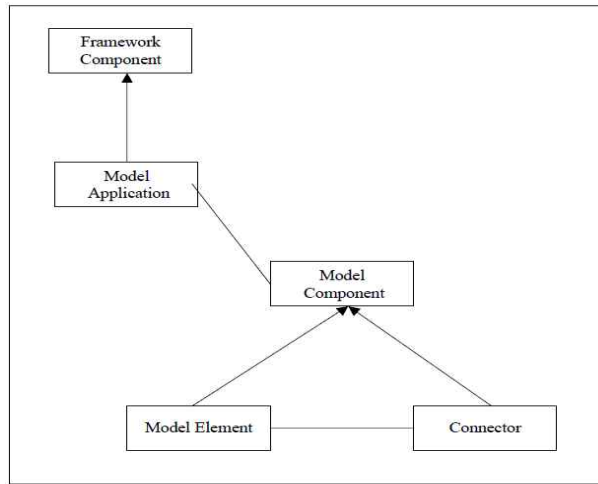


(그림 6-12) Framework와 Framework 컴포넌트 계층도 (Tacke et al., 2001)



(그림 6-13) GF의 물리적 도메인 (HarmonIT, 2002)

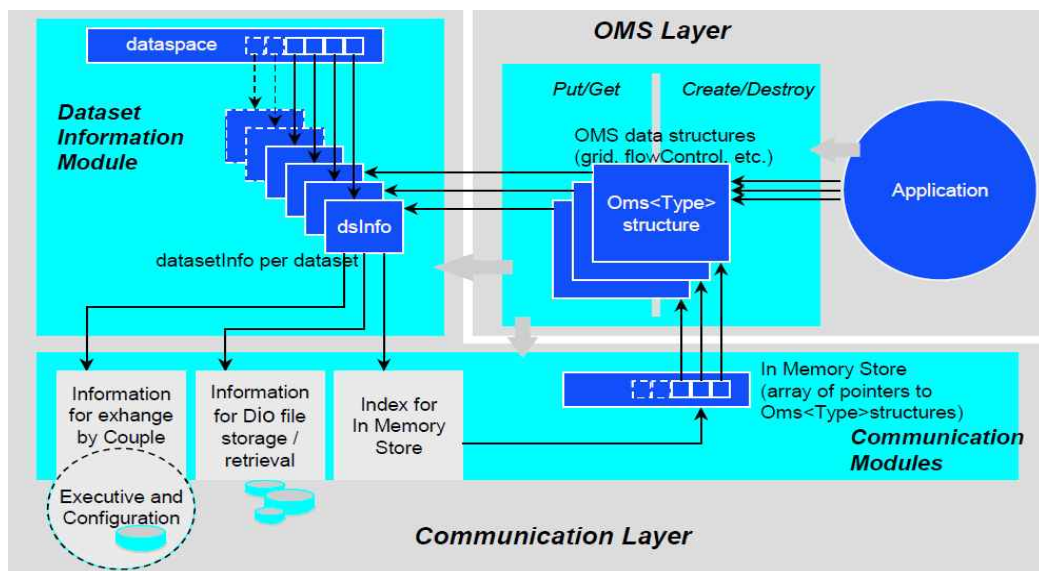
(그림 6-14)는 GF의 모델링 및 모의화면을 나타내고 있다. 기본적으로 모형 컴포넌트를 생성하기 위해 연결되는 모형 요소 (element)와 연결자 (connector)를 사용하는 개념으로 구성되어있다.



(그림 6-14) GF의 모델링 및 모의화면 (HarmonIT, 2002)

나. OMS

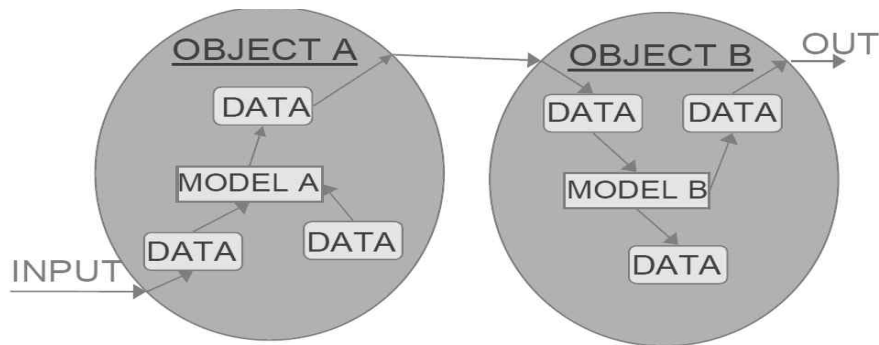
Object Modeling System (OMS)은 2D/3D에서의 유속 시뮬레이션과 이송과정을 연구하기 위해 개발된 모형 시스템으로 Delft3D 시스템과 Simona 시스템을 통합해서 개발되었다. OMS의 기본 개념은 모든 시스템과 모형 컴포넌트를 독립적인 모듈로 나타내는 것이며 legacy computational cores 사이에 자료 교환과 동기화가 가능하도록 유연한 환경을 제공한다. 분명하게 정의된 인터페이스와, 자료구조, 통신 프로토콜, 파일 형식의 표준화를 통해 낮은 단계의 통신 (low-level communication)에 초점을 맞추도록 개발하였다. (그림 6-15)는 OMS의 구조를 보여주고 있다.



(그림 6-15) OMS의 구조 (HarmonIT, 2002)

다. ICMS

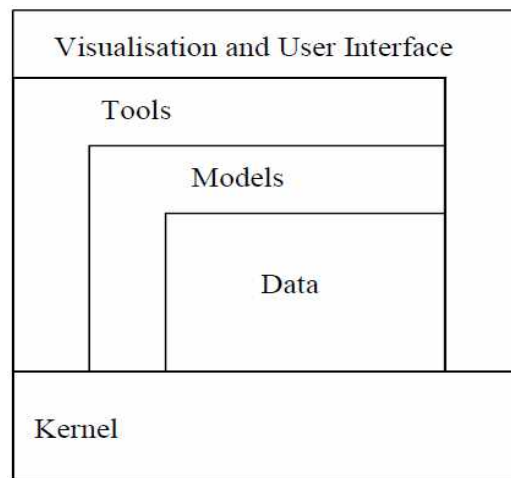
Integrated Catchment Modelling System (ICMS)은 시각적인 표현 (graphical representation)을 이용하여 사용자가 유역 모형을 생성, 연결, 실행할 수 있는 기능을 제공한다 (Reed et al., 1999). ICMS는 호주의 CRC (Co-operative Research Centre)에서 개발하였으며, 특히 수질관리를 위한 모형으로 설계되었다. ICMS는 자료를 수정하고 도식화하는 기능, 시나리오를 모의하는 기능, 통합모형의 민감도를 확인하는 기능을 제공하며, 객체와 클래스를 사용하여 유역과 프로세스 (process)를 나타낸다. (그림 6-16)은 ICMS의 객체연결을 도식화하여 나타내고 있다.



(그림 6-16) ICMS의 객체연결 (HarmonIT, 2002)

라. TIME

TIME (The Invisible Modelling Environment)은 환경 모형을 개발하고 적용하기 위한 공통의 구조를 제공하는 객체로 구성된 Framework이다. 호주 CRC에서 개발하였으며, Microsoft .NET을 사용하여 컴포넌트 기반의 연산을 위한 다언어 플랫폼을 제공하므로 다양한 언어로 개발한 모형 컴포넌트를 빠르게 통합하여 개발할 수 있다. TIME은 다수의 자료처리와 시각화를 위해 재사용이 가능한 요소들을 활용하여 시각적으로 편리한 사용자 환경과 모듈의 통합 기능을 지원한다 (Murray et al., 2006). (그림 6-17)은 TIME의 전체적인 구조를 보여주고 있다.

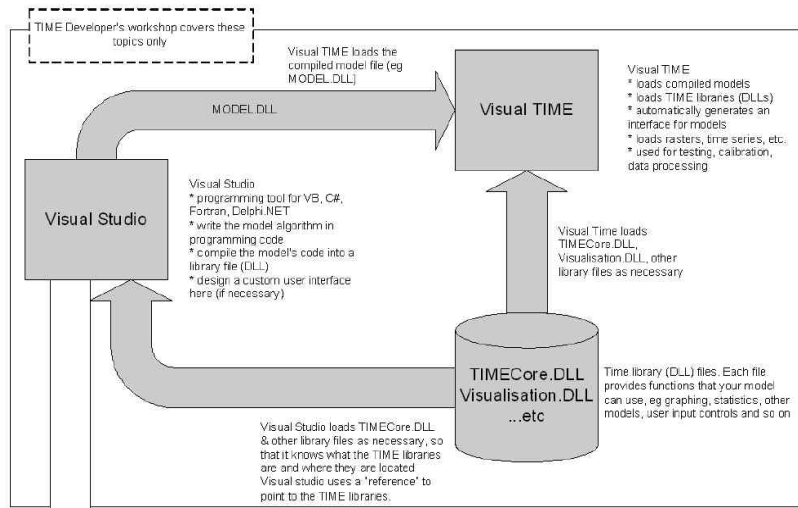


(그림 6-17) TIME 구조 (Murray et al., 2006)

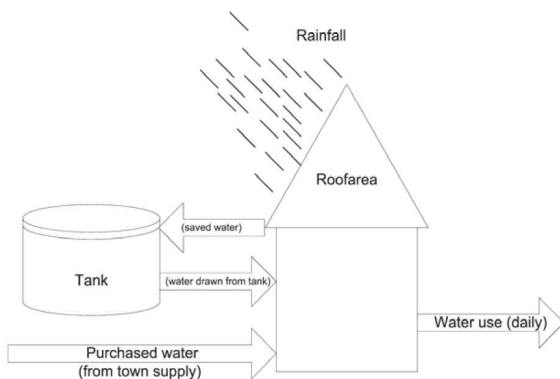
TIME 플랫폼의 구조는 Kernel, Data, Models, Tools, Visualization and User Interface의 5개의 층으로 나눌 수 있으며 각각의 층은 하위 층과 상호작용할 수 있도록 설계되었다. Kernel 층은 TIME의 다른 층에 대한 핵심적인 구조를 포함하고 있는 층으로 여러 가지의 metadata 기호들과 같은 모형의 특성을 구분하는 기호를 포함한다. Data와 Models은 TIME의 핵심체제를 나타내는 층으로 Data 층은 자료 입출력 작용과 관련되는 기작과 자료를 표현하는 방법을 나타내고, Models은 모형 구성요소를 포함하는 곳으로 각 요소들을 만들어내는 부분이다. Visualization and User Interface은 모형의 시각화와 사용자 편의 환경을 구성하는 부분이다.

TIME을 이용한 모형개발은 TIME, VisualTIME, Microsoft Visual Studio의 관계를 통해 수행된다. TIME은 사용자가 필요로 하는 일련의 클래스, 라이브러리, 컴포넌트, 모형을 제공하며, VisualTIME은 사용자 편의가 맞게 구성된 모형을 테스트하는 프로그램이고, Visual Studio는 TIME의 라이브러리, VisualTIME으로 생성한 모형 라이브러리 등을 컴파일할 수 있는 프로그램 도구이다. (그림 6-18)은 TIME을 이용한 전체적인 개발과정을 보여주고 있다.

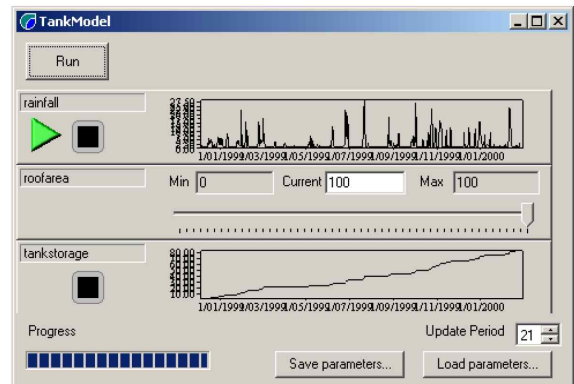
(그림 6-19)는 TIME을 이용하여 개발한 모형의 예를 나타내고 있다.



(그림 6-18) TIME을 이용한 개발과정 (Murray et al., 2006)



(a) The structure of simple temporal model



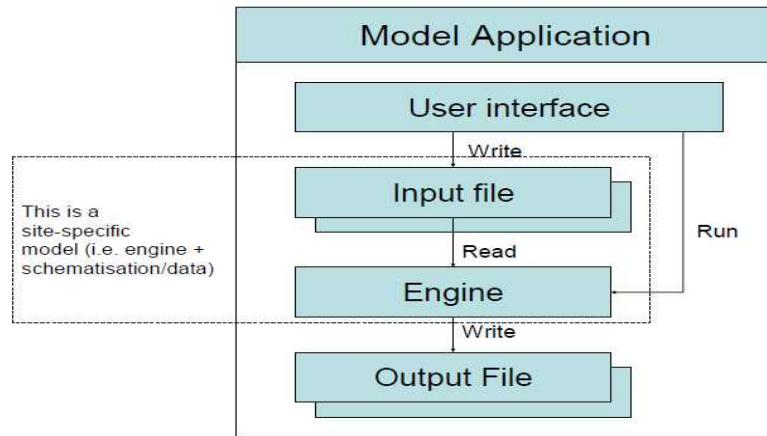
(b) The model display

(그림 6-19) TIME을 이용하여 개발한 모형의 예 (Murray et al., 2006)

마. OpenMI

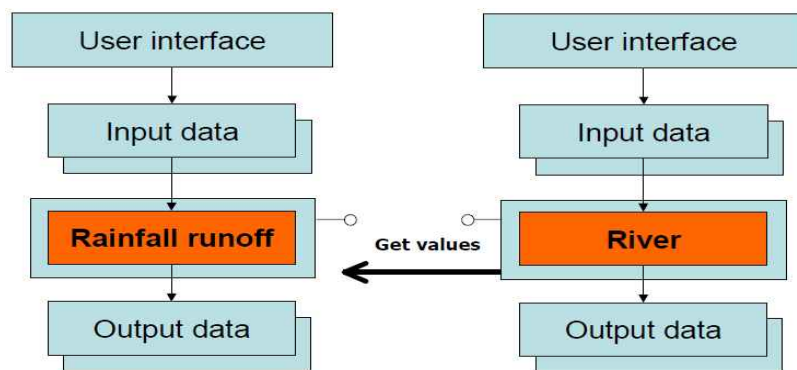
OpenMI (Open Modelling Interface)는 개방형 표준 인터페이스로 OpenMI와 호환이 가능한 컴포넌트간의 자료를 교환하고 실행할 수 있도록 지원한다. OpenMI는 유럽의 HarmonIT 프로젝트를 통해 14개 기관과 7개 나라가 참여하여 개발되었다.

일반적으로 모델링 시스템은 사용자 인터페이스와 엔진으로 구성되며, OpenMI도 이와 같은 구성이다. (그림 6-20)은 OpenMI를 응용하는 일반적 구조를 나타내고 있다.



(그림 6-20) Open MI를 응용하는 일반적 구조 (Moore et al., 2010)

OpenMI는 표준인터페이스를 모형 정의(Model definition), 구성(Configuration), 실행 작업 (Run-time operation)으로 정의한다. 모형 정의는 다른 연결 가능한 컴포넌트들이 이 모형에서 교환할 수 있는 용어 및 장소가 무엇인지 알려주는 기능을 포함하고, 구성은 두 개의 모형이 특정한 목적으로 연결되었을 때 무엇을 교환할 것인지를 정의하며, 실행 작업은 모형이 실행하는 동안 자료를 사용하거나 제공하도록 지원한다. (그림 6-21)은 OpenMI를 이용하여 두 모형을 연계한 것을 나타내고 있다.

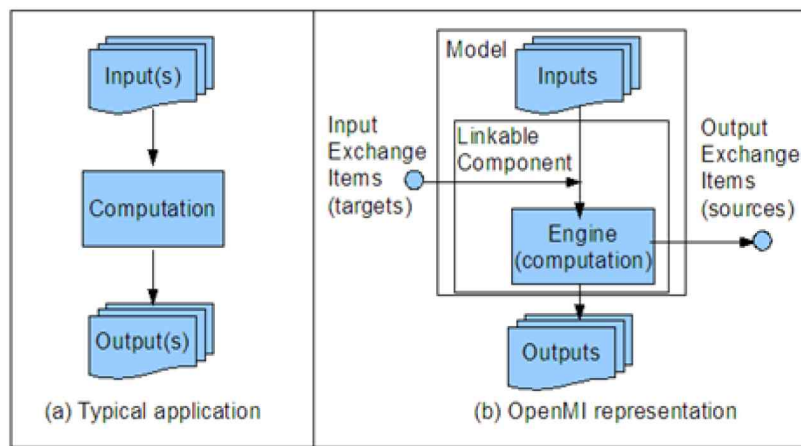


(그림 6-21) OpenMI 이용 모형 간 연계 (Moore et al., 2010)

OpenMI는 모형을 동시에 구동하는 곳에서 자료를 교환할 수 있도록 지원해주는 훌륭한 메카니즘을 제공한다. 따라서 단순히 순차적인 연결보다 조금 더 정확하게 상호작용할 수 있다. OpenMI는 통합 응용프로그램 시스템을 구성하는 것을 우선시하며 이러한 통합

시스템은 동적으로 연결된 어플리케이션에 기초를 두고 있을 때에만 개발할 수 있다. 따라서 OpenMI 협회는 어플리케이션을 연결하는 통합된 방법을 개발해왔고 이를 OpenMI 표준이라 명명하였다. OpenMI 표준은 과거의 개발한 어플리케이션과 새롭게 개발한 어플리케이션에 모두 사용할 수 있도록 고안되었다.

전형적인 응용프로그램은 분산된 단계를 통해 연산이 이루어진다. 대체로 입력, 계산, 출력의 순서로 이루어진다. OpenMI는 기존 어플리케이션의 계산 단계와 엔진이라 지칭되는 계산을 수행하는 코드에 초점을 맞추어서 개발하였다. 또한 OpenMI는 연결가능한 컴포넌트를 동적인 자료 교환을 제공하는 기능이 적용된 엔진으로 명명하였다. 동적인 자료는 입력 교환과 출력 교환 항목을 연결함으로써 생기는 컴포넌트사이에서 교환된다. (그림 6-22)는 일반적인 어플리케이션과 OpenMI의 자료 처리 과정을 나타내고 있다.



(그림 6-22) OpenMI의 자료 처리 과정 (Moore et al., 2010)

이러한 접근은 계산하기 전에 모든 자료를 입력하는 것과 계산이 완전히 완료되기 전에는 어떠한 자료도 출력하지 않는다는 기존의 통념을 깨고 새로운 개념을 제안한다. OpenMI는 엔진에서 자료를 사용하기 바로 직전 입력자료를 요청하고, 엔진에서 계산이 완료되면 바로 출력 자료를 생성한다. 이러한 개념을 실현하기 위해서 어플리케이션은 동적인 자료 교환이 가능한 엔진 컴포넌트 기반으로 바뀔 필요가 있으며 OpenMI는 이러한 내용을 표준으로 삼아 제공하고 있다.

제 3 절 해외 논문

앞서 기술하였듯이 본 연구에서는 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복잡화에 따른 종합적인 농촌용수 물순환 해석 요소 기술 및 모델링 Framework를 구축하기 위하여 수많은 해외 논문을 수집/분석/고찰하였으며, 자세한 내용은 [제 2 장 국내외 기술개발 현황]과 [제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과]의 각 절에 수록되어 있다.

본 과업에서는 연구 결과물을 해외에 널리 알리고, 또한 해외 저명인사로부터 과학적/논리적 입증받기 위하여 SCI급 논문 4편을 작성하여 투고하였으며, 2015년 8월 현재 심사 중이다. 해당 논문들을 작성하기 위하여 해외 최신 논문을 다수 인용하여 고찰하였

다. 해당 해외 논문을 수집 후 연구한 결과를 요약한 것이 본 연구에서 작성한 SCI 논문의 ABSTRACT 부분이니, 본 절에서는 이를 수록토록 하겠다.

<표 6-5>는 CREAMS-PADDY 모형의 기작을 수정/개선하고 전·후처리 컴포넌트를 추가하여 논에서의 수문 및 수질을 추정하는 모형을 개발하는 내용으로, 자세한 내용은 [제3장 제3절 3. 논에서의 수문·수질 해석 모형의 개발 및 적용]에 상세히 서술되어 있다.

<표 6-6>은 확률론적인 방법을 이용하여 기후변화에 따른 홍수 위험도를 평가하는 연구 내용이다. 대상 유역으로는 대한민국 시군 전역을 선정하였으며, RCP 시나리오를 이용하여 미래 기상자료를 구축하였다. 홍수 위험도는 홍수 위험을 나타내는 지표를 선정하여 적합한 확률분포 (GEV)로 적합시킨 다음 합성곱 (Convolution)을 이용하여 최종적으로 평가하였다.

최근 들어 기후변화에 의한 용수수요에 대한 요구는 증대되는 반면 신규 수자원 개발은 지양되는 사회적 여건 변화 속에서 농업 수자원의 체계적이고 효율적인 운용 및 관리를 위해 보다 정확한 저수지 물수지 모델링 기법이 적용될 필요성이 있다. 이에 따라, <표 6-7>의 연구가 수행되었으며, 내용은 관개효율이 시간에 따라 변하는 특징과 최근의 농업용 저수지가 홍수 조절을 고려하는 저수지 운영 규칙을 개발하여 저수지 물수지 모델링에 적용하며, 이를 기존의 운영 규칙과 비교/평가하는 것이다.

<표 6-8>은 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각 독립적인 컴포넌트로 모듈화하고 다수의 모듈을 조합하여 특정 문제에 맞게 사용자 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 컴포넌트 기반 농촌용수 물순환 해석 Framework인 COMFARM (COMponet-based Modeling Framework for Agricultural Reservoir watershed Management)을 개발한 내용이다.

이들 4편 논문에서 인용한 해외문헌 중 비교적 최신인 2009년 이후 논문의 저자/게재년도/제목/학회지 등을 정리하였으며, <표 6-9>와 같다.

<표 6-5> 해외 투고 논문: PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a paddy field modelling system for predicting pollutant (nutrient) loads and evaluating various Best Management Practices (BMPs) on paddy fields. The system consists of a pre-processing, the CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems for PADDY), and a post-processing component. The CREAMS-PADDY model was selected as the core model. The pre-processing component includes manipulation of meteorological data, management of input parameters such as spatial characteristics and farming methods, batch running, and implementing various scenarios. The post-processing component contains visualization of water balance and nutrient balance components and statistical analysis for calibration, validation, and application. To evaluate the applicability of the developed system, reduction effects on water control methods in paddy fields were simulated. Model parameters related to hydrology and water quality were calibrated and validated by comparing model predictions with the field data collected for two years. The simulation results indicated that reducing the nutrient loss through surface drainage by water-saving irrigation and raising the height of drainage outlet could protect downstream water quality. The simulation system will be a useful tool for planning BMPs to reduce nutrient loads from paddy fields in Korea.

<표 6-6> 해외 투고 논문: PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a probabilistic method for flood-risk assessment under climate change. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) released the Representative Concentration Pathways (RCP) in preparation for climate change; the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were selected to examine future flood damage. The study area was South Korea. The spatial and temporal resolutions were on a city and county basis, and four time periods (1990s: 1976-2005, 2025s: 2011-2040, 2055s: 2041-2070 and 2085s: 2071-2100). Proxy variables were selected to assess flood risk. Indicators were standardised using the Z-score method and principal component analysis was conducted to calculate the weighting of indicators. Probability distribution of each indicator was fitted to analyse the flood risk. The Generalized Extreme Value (GEV) distribution was selected as the appropriate distribution. Convolution was used to merge all probability density functions. The results show flood risk increasing during the 2025s period and continuing to rise up to the 2055s period. Especially, the increase from 1990s to 2025s is so large that countermeasures need to be developed. It also predicted that southern areas are at greater risk of flooding. These are expected to be used as appropriate data to establish an adaptation policy for climate change.

<표 6-7> 해외 투고 논문: WATER BALANCE OF IRRIGATION RESERVOIRS CONSIDERING FLOOD CONTROL AND IRRIGATION EFFICIENCY VARIATION

ABSTRACT

The combination of limited water resources and ever-growing water demand requires more accurate approaches for reservoir water balance analyses. The goal of this study was to develop a new operation scheme by considering flood control and irrigation efficiency variation for simulating reservoir water balance components. Observed reservoir water levels from four reservoirs in Korea were used to evaluate the new scheme. As the result of a sensitivity analysis, variations in irrigation efficiency appeared to be most sensitive for the outflow variables and was thus calibrated on a yearly basis for the new scheme. Other parameters were calibrated to fixed values. Compared with two other operation schemes, i.e., excluding the flood control and excluding the irrigation efficiency variation, the new scheme performed better than the other two schemes with Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.66 to 0.93 and 0.79 to 0.89 for the calibration and validation period, respectively. It was concluded that the new scheme can advance simulation accuracy for water balance components and also provide flexibility in evaluating regional water resources security under various conditions.

<표 6-8> 해외 투고 논문: DEVELOPMENT OF A COMPONENT-BASED MODELING FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL WATER-RESOURCE MANAGEMENT

ABSTRACT

Because of the many complicating factors inherent in water-cycle analyses of agricultural watersheds, for efficient water management, hydrologic modeling must be carefully designed to reflect the physical characteristics along with complex and diverse agricultural practices. Hence, component-based modeling approaches are needed to consider a number of processes concurrently and comprehensively, especially irrigation-reservoir operation and paddy-farming practices, into water-cycle models of agricultural watersheds. The primary objectives of this study were twofold: (1) to develop a Component-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM) using an object-oriented programming technique; and (2) to evaluate its applicability for an agricultural watershed with diverse and complicated land use as a case study. COMFARM is a user-friendly, highly interoperable, and lightweight modeling framework that supports the development of watershed-specific domain components. It is thus suitable for the design and creation of a component-based modeling system at the agricultural watershed-scale. COMFARM was developed with the JAVA programming language, using Eclipse software to allow modelers and users more flexibility in creating their own modeling systems by customizing linkable components composed of a number of element modules. The developed framework was applied to the Young-Nam irrigation-district watershed in South Korea. This watershed contains a reservoir-irrigated rice paddies. Results show that the framework performed well, providing a convenient way for users to construct models in addition to multilateral data analysis for studying agricultural watersheds. COMFARM is a useful tool for developing effective water-management measures by allowing for the construction of a modeling system and evaluation of multiple operation scenarios customized to a specific watershed. This is an essential step in policy-making for long-term water-resources management.

<표 6-9> 본 연구에서 인용한 2009년 이후 대표 해외 논문

1. Antonopoulos, V. Z., 2010. Modelling of water and nitrogen balances in the ponded water and soil profile of rice fields in Northern Greece. *Agricultural water management*, 98(2), 321–330.
2. Ashofteh, P. S., Haddad, O. B., Mariño, M. A., 2013. Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 89–97.
3. Castronova, A. M., Goodall, J. L., 2010. A generic approach for developing process-level hydrologic modeling components. *Environmental Modelling & Software*, 25(7), 819–825.
4. Castronova, A. M., Goodall, J. L., 2013. Simulating watersheds using loosely integrated model components: evaluation of computational scaling using OpenMI. *Environmental Modelling & Software*, 39, 304–313.
5. Chan, F. K. S., Adekola, O., Mitchell, G., Ng, C. N., McDonald, A., 2013. Towards sustainable flood risk management in the Chinese Coastal Megacities. A case study of practice in the Pearl River Delta. *Irrigation and Drainage*, 62(4), 501–509.
6. Choi, J. D., Park, W. J., Park, K. W., Lim, K. J., 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. *Paddy and Water Environment*, 11(1–4), 241–248.
7. David, O., Ascough, J. C., Lloyd, W., Green, T. R., Rojas, K. W., Leavesley, G. H., Ahuja, L. R., 2013. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The Object Modeling System. *Environmental Modelling & Software*, 39, 201–213.
8. de Vries, M. E., Rodenburg, J., Bado, B. V., Sow, A., Leffelaar, P. A., Giller, K. E., 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. *Field Crops Research*, 116(1), 154–164.
9. De Wrachien, D., Mambretti, S., Schultz, B., 2011. Flood management and risk assessment in flood-prone areas: Measures and solutions. *Irrigation and drainage*, 60(2), 229–240.
10. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., Mariño, M. A., 2013. Extraction of multicrop planning rules in a reservoir system: Application of evolutionary algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 490–498.
11. Food and Agricultural Organization (FAO), 2010. STAT Database 2009. Rome.
12. Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J. E., Poussin, J. C., Cecchi, P., 2015. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 152, 99–109.
13. Fraser, E. D., Simelton, E., Termansen, M., Gosling, S. N., South, A., 2013. “Vulnerability hotspots”: Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 195–205.
14. Gibbs, M. S., Maier, H. R., Dandy, G. C., 2012. Development of Decision Support Frameworks for Water Resource Management in the South East. Goyder Institute for Water Research Technical Report Series No. 12/3.
15. Hellegers, P. J. G., Jansen, H. C., Bastiaanssen, W. G. M., 2012. An interactive water indicator assessment tool to support land use planning. *Irrigation and drainage*, 61(2), 143–154.
16. Heo, N., 2014. Lessons from the progress of Korea’s environmental impact assessment system in the agricultural sector. *Irrigation and Drainage*, 63(2), 241–245.
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

<표 6-9> 본 연구에서 인용한 2009년 이후 대표 해외 논문 (계속)

18. Jang, T. I., Kim, H. K., Seong, C. H., Lee, E. J., Park, S. W., 2012. Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 104, 235–243.
19. Jang, T., Kim, H., Kim, S., Seong, C., Park, S., 2011. Assessing Irrigation Water Capacity of Land Use Change in a Data-Scarce Watershed of Korea. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 445–454.
20. Jang, T., Kim, H., Kim, S., Seong, C., Park, S., 2012. Assessing Irrigation Water Capacity of Land Use Change in a Data-Scarce Watershed of Korea. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 445–454.
21. Kang, M. G., Park, S. W., 2014. Combined Simulation-Optimization Model for Assessing Irrigation Water Supply Capacities of Reservoirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), 04014005 1–11.
22. Knapen, R., Janssen, S., Roosenschoon, O., Verweij, P., De Winter, W., Uiterwijk, M., Wien, J. E., 2013. Evaluating OpenMI as a model integration platform across disciplines. *Environmental modelling & software*, 39, 274–282.
23. Kumm, M., Tes, S., Yin, S., Adamson, P., Józsa, J., Koponen, J., Richey, Sarkkula, J., 2014. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake-floodplain system. *Hydrological Processes*, 28(4), 1722–1733.
24. Li, X., Guo, S., Liu, P., Chen, G., 2010. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal of hydrology*, 391(1), 124–132.
25. Nam, W. H., Choi, J. Y., Hong, E. M., 2015. Irrigation vulnerability assessment on agricultural water supply risk for adaptive management of climate change in South Korea. *Agricultural Water Management*, 152, 173–187.
26. Park, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., 2015. Assessment of Flood Vulnerability Based on CMIP5 Climate Projections in South Korea. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 859–876.
27. Patil, M. D., Das, B. S., Bhadoria, P. B., 2011. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice. *Soil and Tillage Research*, 112(1), 66–75.
28. Setiawan, B. I., Imansyah, A., Arif, C., Watanabe, T., Mizoguchi, M., Kato, H. (2014). SRI paddy growth and GHG emissions at various groundwater levels. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 612–620.
29. Wang, H. W., Yang, C. Y., Kuo, P. H., 2013. Application of a decision support system to sustainable lowland planning and management in Yunlin area, Taiwan. *Irrigation and Drainage*, 62(S1), 82–91.
30. Wu, Y., Chen, J., 2012. An operation-based scheme for a multiyear and multipurpose reservoir to enhance macroscale hydrologic models. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 270–283.
31. Wu, Y., Chen, J., 2013. Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: a case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China. *Agricultural water management*, 116, 110–121.
32. Yoo, S. H., Choi, J. Y., Lee, S. H., Oh, Y. G., Yun, D. K., 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural water management*, 117, 43–54.
33. Zhou, Y., Guo, S., 2014. Risk analysis for flood control operation of seasonal flood-limited water level incorporating inflow forecasting error. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 1006–1019.

제 7 장 연구시설 · 장비 현황

제 1 절 소프트웨어 현황

본 연구에서는 농촌용수 물순환 모델링 Framework, 자료관리시스템, 그리고 전처리/표준화 시스템 등을 개발하는 과정에서 다음과 같은 소프트웨어를 구입하였다.

1. Studio FX Premium Subscription (ESD Only)

수문/기상자료, 유출량, 저수지 물수지 요소 등 다양한 모의 결과가 그래프 등으로 구현되어야 하며, 품질향상 및 동적모의 모듈의 효율성을 위하여 Studio FX Premium Subscription을 이용하여 개발에 이용하였으며, 2015년 8월 현재 라이선스가 만료되었음.

2. Chart FX7(Web Forms)

농촌용수 물순환 종합해석 모형은 사용자가 입력자료를 편리하게 구축하기 위해서는 기상청, WAMIS, RAWRIS 등 웹을 통하여 기초자료를 획득해야하고 분석할 수 있어야함. 이를 위하여 Chart FX7을 이용하여 사용자 인터페이스를 구축 및 설계하였다. 2015년 8월 현재 라이선스가 만료되었다.

3. MS SQL (Microsoft SQL Server, Version 2012, USA)

본 연구에서 구입한 관계형 데이터베이스 MS SQL (Microsoft SQL Server, Version 2012, USA)은 농촌용수 물순환 해석을 위해 필요한 기초 자료를 구축하는데 사용하였다. 농촌용수 물순환 자료를 자료 코드 정보, 유역 특성 정보, 저수지 정보, 관측소 정보 테이블을 생성하였으며, 자료 코드 정보 하위에 총 6개의 모형 자료 테이블 (기상청 기상자료, 미래 기상자료, 자료 전처리 정보, 저수지 수위 정보, 관개지구 정보)을 생성하였다. 본 연구에서 구축한 MS SQL은 농촌용수 물순환 해석을 위해 필요한 자료를 실시간으로 구축하여 모형 모의에 필요한 입력 자료를 제공하는 기능을 가진다.

제 2 절 모니터링 장비 현황

1. 이동지구

이동시험지구의 농업용수의 특성을 유역의 강우-유출특성, 주요 수원공 유입, 저류특성 그리고 평야부 관개특성으로 크게 구분하여 이에 따른 현장관측망 항목을 선정하였다. 농업용수 현장 관측항목은 강우량, 하천수위, 저수지 수위와 관개지구의 용·배수로 수위이며 이들 관측 항목에 대해 각각의 관측기를 이동시험지구 현장에 적절하게 설치하여 농업용수 관측망을 설치하여 운영하였다. <표 7-1>은 관측소 관측기기 내역을 나타낸다.

<표 7-1> 이동지구 관측망 관측기기 내역

구 분	지점명	설 치 세 부 내 역
우량관측	용덕	-위치 : 용덕저수지 취수탑 -형식 : 전도형 자기우량계
	미산	-위치 : 미산저수지 사통부 -형식 : 전도형 자기우량계
	이동	-위치 : 이동저수지 관리자 -형식 : 전도형 자기우량계
	은산	-위치 : 은산양수장 인입수로부 -형식 : 전도형 자기우량계
수위관측 (저수위)	용덕	-위치 : 용덕저수지 취수탑 -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	미산	-위치 : 미산저수지 사통 -형식 : 압력식 수위계 (연구원서버로 TM)
	이동	-위치 : 이동저수지 취수탑 -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	노곡	-위치 : 노곡저수지 사통 -형식 : 압력식 수위계 (연구원서버로 TM)
수위관측 (하천수위)	덕성	-위치 : 덕성교 (용덕저수지 유출하천) -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	재인	-위치 : 재인교 (미산저수지 유출하천) -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	미산	-위치 : 미리내 마을 입구 (미산저수지 유입유출하천) -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	묵방	-위치 : 묵방교 (용덕저수지 유입유출하천) -형식 : 기포식 수위계
	한덕	-위치 : 한덕교(용덕저수지 유입유출하천) -형식 : 압력식 수위계
수위관측 (수로수위)	용덕	-위치 : 용덕저수지 급수시점 -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	미산	-위치 : 미산저수지 급수시점 -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	이동	-위치 : 이동저수지 급수시점 -형식 : 초음파식 수위계 (연구원서버로 TM)
	방아	-위치 : 방아지선 시점부 -형식 : 초음파식 수위계
	원암	-위치 : 원암양수장 토출수로 -형식 : 초음파식 수위계
	남사1, 2	-위치 : 진위간선 남사지점, 남사지선부 -형식 : 초음파식 수위계
	은산1, 2	-위치 : 진위간선 은산지점, 은산지선부 -형식 : 초음파식 수위계
	진원	-위치 : 진원간선 시점부 -형식 : 초음파식 수위계
	5호1, 2	-위치 : 진위간선 5호지점, 5호지선부 -형식 : 초음파식 수위계
	은산포장	-위치 : 진위간선 은산포장 -형식 : 초음파식 수위계

2. 동진지구

동진시험지구의 하천은 취입보, 배수갑문, 양배수장의 취입조 및 토출조의 용수간선 및 수로에 총 38지점에 하천 취입보 7지점, 양배수장에 11지점 용수간선 및 지선에 20 지점으로 구성되어있다. 농업용수 모니터링을 위해 시험지구의 현장에 적절하게 관측망을 설치하여 운영하였다. 동진시험지구의 관측기기 내역은 <표 7-2>와 같다.

<표 7-2> 동진지구 관측망 관측기기 내역

지점명	시설명	계측기 유형	수로폭 (m)	수로깊이 (m)
장평보	원평천	USN-5000(센서노출형)		1.45
하장보		USN-5000(센서노출형)		2.5
불로보		USN-5000(센서노출형)		5.7
내광보		USN-1000(센서노출형)	50.0	1.8
심포갑문	갑문	USN-5000(센서노출형)		2.3
가실갑문내측		USN-5000(센서노출형)		4.0
몽산갑문		USN-5000(센서노출형)		3.5
만경양수장흡입	양수장	USN-5000(센서노출형)	3.5	6.0
만경양수장토출		USN-5000(센서노출형)		4.5
청하양수장흡입		USN-5000(센서노출형)		5.0
청하양수장토출		USN-5000(센서노출형)		3.5
신평양수장토출		USN-1000(센서노출형)	4.0	1.9
공덕배수장내측	배수장	USN-5000(센서노출형)	14.0	4.5
공덕배수장외측		USN-1000(센서노출형)	14.0	8.0
신태인배수장내측		USN-1000(센서노출형)	20.0	3.8
신태인배수장외측		USN-5000(센서노출형)		3.7
반월배수장내측		USN-5000(센서노출형)	6.7	5.0
반월배수장외측		USN-1000(센서노출형)	5.0	4.0
백산간선(백산제취입상류)	용수간선	USN-5000(센서노출형)	5.0	1.8
백산간선(백산제취입하류)		USN-1000(센서노출형)	3.0	1.5
호남간선(백산제양수장)		USN-5000(센서노출형)	3.0	1.5
호남간선(배달제방수문)		USN-5000(센서노출형)	2.0	1.3
호남간선말단		USN-5000(센서노출형)	0.8	0.8
백구4호간선(석담방수문)		USN-5000(센서노출형)	2.6	1.3
백구4호간선말단(백구정양수장)		USN-5000(센서노출형)	2.5	1.3
청하간선(버드나무)		USN-5000(센서노출형)	3.6	1.7
김제지선(월촌양수장)	용수지선	USN-5000(센서노출형)	8.0	1.8
와룡지선시점		USN-5000(센서노출형)	1.5	1.4
와룡지선-중앙지선		USN-5000(센서노출형)	2.5	1.5
와룡지선-동부지선		USN-5000(센서노출형)	1.5	1.2
공덕3호지선(호남간선)		USN-5000(센서노출형)	2.0	1.3
월성양수장-봉남간선시점		USN-5000(센서노출형)	1.3	1.5
월성양수장(오정지선시점)		USN-5000(센서노출형)	3.0	1.2
봉남양배수장(내광간선)		USN-5000(센서노출형)	1.0	1.3
봉남양배수장(양전5호지선)		USN-1000(센서노출형)	1.0	1.3
상평양수장(상평용수지선)		USN-5000(센서노출형)	1.5	1.2
가실갑문연락지선시점		USN-1000(센서노출형)		
용마제수문		USN-5000(센서노출형)	14.0	2.2

3. 농어촌연구원 시험지구

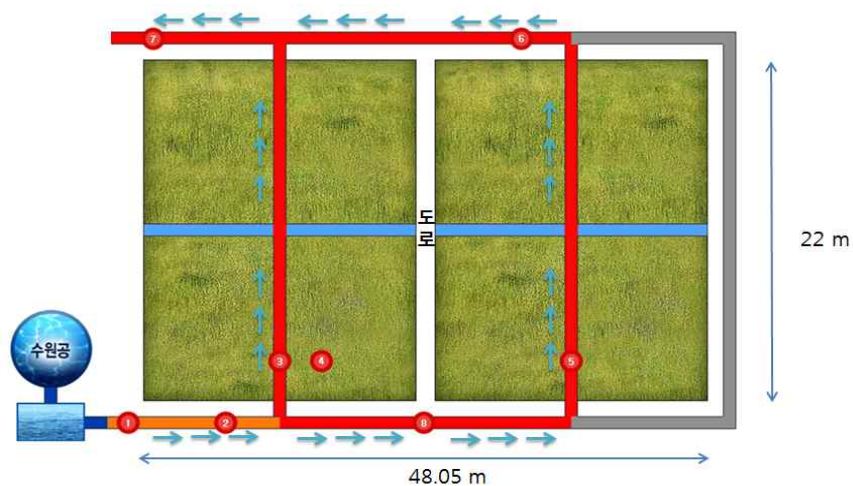
농어촌연구원 시험지구는 (그림 7-1)과 같이 가로 48.05 m, 세로 22.00 m, 면적 941 m²의 직사각형 형태이며 용배수로는 (그림 7-2)와 같이 용수지선 1조, 용수지거 2조, 배수로 1조로 구성되어 있다. 시험지구에 설치된 계측기 현황은 (그림 7-3)과 <표 7-3>과 같다. 계측시설은 초음파 수위계 3개소, 유량계 (과살플룸, 전자유속계, 관로형 유속계) 3개소, 강우계 1개소, 영상계 1개소 등이 있다. 본 시험지구에 공급되는 유량은 용수로 유입부에 설치한 과살플룸에서 측정된 수위를 유량으로 환산한 값으로 산정한다.

<표 7-3> 농어촌연구원 시험지구 계측기 현황

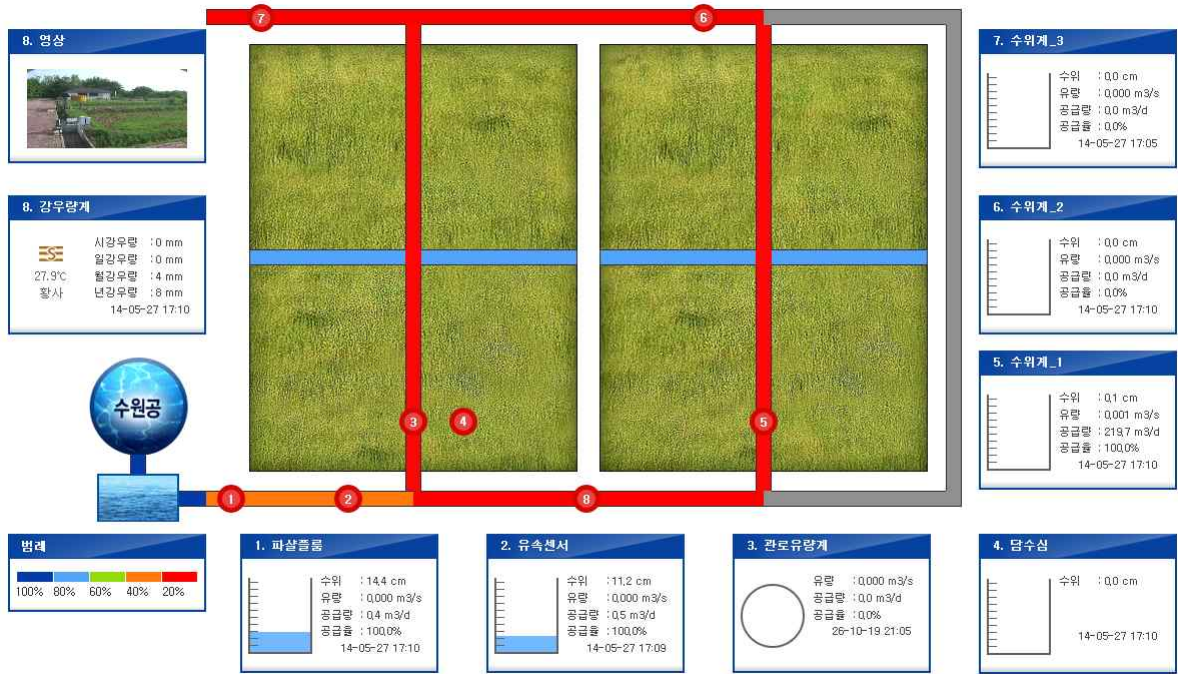
일련번호	지점명칭
1	과살플룸
2	유속센서
3	관로유량계
4	수위계1
5	수위계2
6	수위계3
7	수문개도상태1
8	강우량계
9	영상
10	수문개도상태2
11	담수심



(그림 7-1) 농어촌연구원 시험지구 위치



(그림 7-2) 농어촌연구원 시험지구 용배수로 모식도





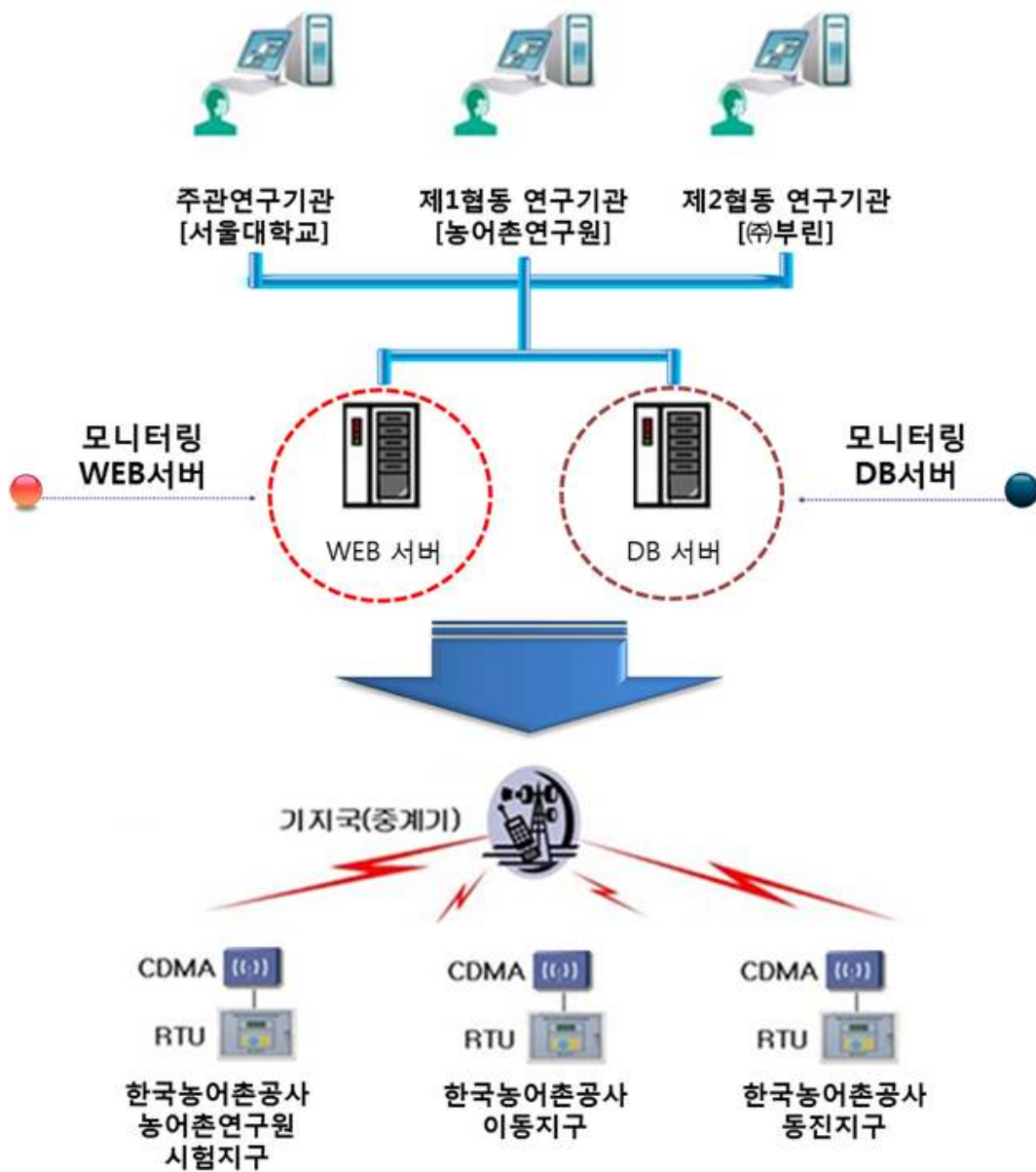
(그림 7-3) 농어촌연구원 시험지구 계측기 위치

4. 모니터링 서버

농촌용수 종합해석 모형 개발을 위해 각 시험지구의 계측장비와 서버를 연계하여 농촌용수 모니터링을 수행하였다. 본 서버를 활용하여 계측 모니터링을 통해 구축한 DB를 농촌용수 종합해석 모형 개발의 기초자료 및 모형 적용성 평가에 활용하였다. 다음(그림 7-4)은 모니터링 시험지구와 서버를 연계하는 모식도를 나타내며 <표7-4>는 농촌용수 모니터링 서버의 내역등을 기재하였다.

<표 7-4> 농촌용수 모니터링 서버

구분	제조사	모델명	SPEC			사진
			CPU	Memory	HDD	
모니터링 DB 서버	IBM	X365DM4	XEON E5-2609 4Core 2.4GHz	16GB	4TB	
모니터링 WEB 서버	HP	DL580G7 E7-4807 1.86GHz	Intel Xeon E7-4807 Hexa Core 1.86GHz	64GB	2.4TB	



(그림 7-4) 농촌용수 모니터링 시험지구 서버 연계

제 8 장 연구실 안전관리 이행실적

주관연구기관인 서울대학교의 연구실 안전관리 실태조사는 1998년부터 환경교육의 내실화와 실험실 안전사고 예방에 관한 지침서 제작 등의 목적으로 학내 이공계 실험실 및 연구실을 대상으로 21개 기관 (연건, 수원캠퍼스 포함) 122개 실험실에 대하여 전국대학 최초로 시작되었다. 2003년에는 전체 이공계 1,368개, 2004년에는 위험도가 높은 A·B급 686개 실험실을 대상으로 개인안전, 장비관리, 소방안전, 전기안전, 가스안전, 화학약품관리, 폐기물관리, 동물실험안전, 미생물실험안전, 방사선 안전, 기계설비안전 등의 안전관리 실태를 파악하였으며, 그 후로 매년 200여개의 실험실을 대상으로 실태조사를 실시하여 왔다. 서울대학교는 안전하고 쾌적한 실험실 환경을 조성하고, 유독물질과 방사성물질 등의 위험으로부터 미연에 사고를 방지하기 위하여 노력하고 있다.

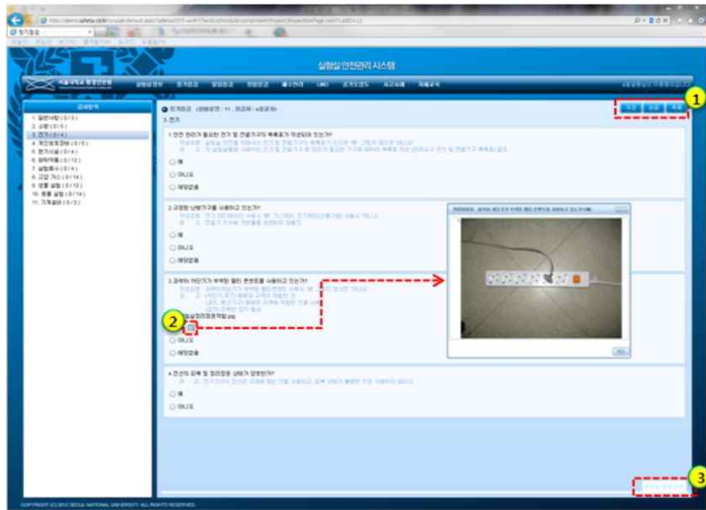
연구활동 종사자는 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률” 제18조 (교육, 훈련 등)에 따라 서울대학교 환경안전원장의 주관 하에 2시간의 신규 (신입생) 교육과 매 학기 (6개월) 마다 6시간의 정기 환경안전교육을 의무적으로 받도록 되어있다. 서울대학교에서는 이러한 요건을 충족시켜 대학 및 연구기관의 안전교육 활성화를 유도하고 연구활동 종사자의 교육 참여율을 제고하기 위해 교육하고 있다. 환경안전교육은 실험의 특성에 따라 이화학 실험과 동물 및 미생물을 취급하는 대학 및 연구기관, 이화학실험을 주로 하는 대학 및 연구기관, 그리고 기계 및 전기 (컴퓨터 작업 등)을 취급하는 대학 및 연구기관 등으로 분류하여 진행된다. 한편, 2015년부터는 환경안전교육 관련 콘텐츠를 서울대학교 교수학습개발센터에서 운영하고 있는 온라인 공개강좌 기반 시스템에 접목하여 연구실 안전환경 정기교육을 온라인 기반으로 구축하였으며, 이를 활용하여 연구활동종사자에게 자체 교육자료를 지원하고 온라인 교육을 위한 환경안전교육 관련 콘텐츠를 제공하고 있다. (그림 8-1)은 본 연구 참여연구원의 환경안전교육 수료 현황을 보여주고 있다.

서울대학교의 환경안전원에서는 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률” 제8조 (안전점검의 실시) 및 “서울대학교 연구실 안전환경” 제8조 (안전점검 실시)와 관련하여 학내 연구실의 안전점검을 실시한다. 안전점검 대상이 되는 연구실은 이공계 (미대 포함) 대학 및 연구기관에서 수업 또는 연구를 위하여 시설·장비·연구재료 등을 갖추어 설치한 실험실·실습실·실험준비실 등이며, 각 연구실의 책임자(또는 2년 이상 근무자)는 연구실 정기점검 실시에 앞서 자체점검을 실시할 의무가 있다. 연구실 자체점검은 서울대학교 환경안전원 웹사이트에 구축된 서울대학교 실험실안전관리시스템에 따라 진행된다. (그림 8-2)는 서울대학교 실험실안전관리시스템 웹페이지를 보여주고 있다.

(그림 8-3)은 안전점검표 중 1. 일반사항을 보여주고 있다. 이 밖에 2. 소방, 3. 전기, 4. 개인보호장비, 5. 환기시설, 6. 화학약품, 7. 실험폐수, 8. 고압가스, 9. 생물실험, 10. 동물실험, 11. 기계설비 등으로 구분된다. 본 연구진이 속한 서울대학교 연구실은 해당 안전점검표에 따라 안전하고 쾌적한 연구실 환경조성을 위하여 정기적인 점검을 실시하고 있다.



(그림 8-1) 본 연구 참여연구원 환경안전교육 수료 현황



(그림 8-2) 실험실 안전관리시스템 웹페이지

1. 일반사항

항 목	결 과	작성요령
실험실 일일점검을 실시하고 그 기록을 비치하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오	- 작성요령: 실험실 특성에 맞는 일일 점검표를 작성하며 점검을 실시하고, 그 결과를 보관하고 있으면 '예'에 체크 - 권고: 실험실 특성에 맞는 점검표에 의해 점검을 실시 함 - 첨부 양식 참조
음식을 섭취 및 흡연 금지를 비롯한 실험실 안전수칙을 준수하고 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오	
실험실 정리정돈은 잘 되어 있는가?	<input type="checkbox"/> 예 <input type="checkbox"/> 아니오	

(그림 8-3) 실험실 안전점검표 (1. 일반사항)

제 9 장 참 고 문 헌

1. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모델을 이용한 오염총량모의모형 개발. 서울대학교 박사학위논문.
2. 강문성, 2008. 오염총량관리를 위한 농업비점원오염모형. 수자원정보 Water Resources Information, 48, 3-18.
3. 강문성, 2010. 농업비점오염 저감을 위한 영농방법개선 기법 개발, 전원과자원, 52(4), 40-50.
4. 강문성, 김철겸, 2009. 최근 수질모델링 기법 및 연구동향. 한국관개배수, 16(1), 20-29.
5. 강문성, 박승우, 2003. 인공신경망 이론을 이용한 단기 홍수량 예측. 한국농공학회지, 45(2), 45-37.
6. 강문성, 박승우, 임상준, 2001. 소유역에서의 수계환경관리 및 평가시스템의 개발(I) - 시스템의 개발 및 구성 -. 한국농촌계획학회지, 7(1), 3-13.
7. 강문성, 박승우, 허용구, 2001. 소유역에서의 수계환경관리 및 평가시스템의 개발(II) - 시스템의 운용과 적용 -. 한국농촌계획학회지, 7(1), 15-25.
8. 강문성, 송인홍, 김철겸, 김진택, 2012. 수질모델링의 이해 및 적용. 서울대학교 지역시스템공학과.
9. 강문성, 송정현, 박지훈, 송인홍, 기우석, 김진택, 2015. 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개. 전원과자원, 57(1), 55-62.
10. 강민구, 2004. 하천망 모형과 전역최적화 기법을 이용한 저수지의 용수 최적 배분. 서울대학교 박사학위 논문.
11. 강민구, 박승우, 임상준, 1997. SSARR 모형을 이용한 농업용 소유역의 일유출량 추정. 한국농공학회 국제심포지엄 및 학술발표회 발표논문집, 221-226.
12. 강민구, 오승태, 김진택, 2013. 관개지구의 관행 물관리를 고려한 저수지 용수공급량 추정. 한국농공학회논문집, 56(5), 1-9.
13. 강민구, 이주현, 박기욱, 2013. 미계측 유역 유출 모의를 위한 Tank 모형의 매개변수 지역화. 한국수자원학회논문집, 46(5), 519-530.
14. 강성준, 박영기, 2011. 미계측유역에 대한 TOPMODEL의 적용성 평가. 한국산학기술학회논문지, 12(3), 1458-1464.
15. 건설교통부, 1999. 수자원계획의 최적화 연구 (III): 물공급 안전도 평가 및 용수수급 계획 체제 개발. 한국건설기술연구원.
16. 경기도, 2003. 청미천수계 하천정비기본계획.
17. 경기도, 2008. 청미천수계 하천기본계획.
18. 국토해양부, 2011. 수자원장기종합계획.
19. 국토해양부, 2011. 청미천 하천기본계획(변경) 보고서.
20. 김계웅, 송정현, 안지현, 박지훈, 전상민, 송인홍, 강문성, 2014. 유역 유출량 추정을

- 위한 TANK 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가. 한국농공학회논문집, 56(4), 9-19.
21. 김남길, 2010. 표면영상유속계를 이용한 하천의 유속측정기술 개발, 동의대학교 토목공학과 박사학위논문.
 22. 김남원, 신아현, 김철겸, 2009. 충주댐 유역의 SWAT-K와 HSPF모형에 의한 수문 성분 모의특성 비교 분석. 한국환경과학회지, 18(6), 609-619.
 23. 김민경, 노기안, 이남중, 서명철, 고문환, 2005. 경지 정리된 광역 논에서 영양물질 수지와 배출 특성. 한국토양비료학회지 38(3), 164-171.
 24. 김민주, 김태근, 2014. BASINS/WinHSPF 모형을 이용한 비점오염물질 유출특성 분석과 최적관리기법 적용. 환경영향평가 23(2), 88-100.
 25. 김병식, 김보경, 경민수, 김형수, 2008. 기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가. 한국수자원학회논문집, 41(4), 379-394.
 26. 김상민, 2004. 비점오염 모형을 이용한 하수처리수 재이용에 따른 유역 오염 총량 영향 분석. 서울대학교 박사학위논문.
 27. 김상민, 김성재, 김용완, 박태양, 김성민, 박기욱, 장민원, 2011. 농업용 저수지에서의 환경용수 방류 능력 평가. 한국농공학회논문집, 53(6), 101-109.
 28. 김서준, 2013. 표면영상유속계 오차 분석을 통한 상관영역 크기 결정 기법 개발, 명지대학교 토목환경공학과 박사학위논문.
 29. 김서준, 류권규, 윤병만, 2011. 고정식 표면영상유속계(FSIV)를 이용한 실시간 하천 유량 산정. 한국수자원학회논문집, 44(5), 377-388.
 30. 김서준, 류권규, 윤병만, 2013. 상관영역 크기 변화에 따른 영상유속계의 오차 분석. 한국수자원학회논문집, 46(8), 821-831.
 31. 김선주, 김필식, 윤찬영, 2000. 미계측유역의 일유출량 추정을 위한 탱크모형 매개변수의 회귀식 산정, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
 32. 김선주, 서동일, 안기홍, 2011. 저수지 수온성층 해석능력 제고를 위한 적정 EFDC 매개변수 선정. 한국수자원학회논문집, 44(9), 741-751.
 33. 김선주, 지용근, 김필식, 2005. 강우-유출모형의 매개변수 보정을 위한 최적화 기법의 비교분석. 한국농공학회논문집, 47(3), 3-13.
 34. 김억기, 안원식, 이채영, 엄명진, 2012. 강수지역구분을 위한 최적 자료 전처리 기법 분석. 한국방재학회논문집, 12(5), 233-240.
 35. 김종진, 임경재, 박윤식, 허성구, 박준호, 안재훈, 김기성, 최중대, 2007. 경상도에 따른 CN 보정에 의한 L-THIA 직접유출 모의 영향 평가. 한국물환경학회지, 23(6), 897-905.
 36. 김지용, 정상옥, 2001. Tank Model 매개변수의 민감도 분석. 한국관개배수학회논문집, 8(2), 55-63.
 37. 김지훈, 홍성구, 권순국, 1998. 지리정보시스템을 이용한 SWAT 모형의 적용. 전원과자원, 40(4), 67-76.

38. 김철, 김석규, 2004. 지형자료를 이용한 TANK 모형의 매개변수 최적화. 대한토목학회논문집, 24(26), 553-560.
39. 김철겸, 김남원, 2012. TANK 모형과 SWAT 모형을 이용한 한강유역의 자연유출량 산정 비교. 한국수자원학회논문집, 45(3), 301-316.
40. 김태철, 이호천, 문종필, 2010. 대평 양수장 지구의 농업용수회귀율 추정. 한국농공학회논문집, 52(1), 41-49.
41. 김학관, 2009. 경지 및 도시 불투수면을 고려한 유역 수문 · 수질 모델링, 서울대학교 박사학위 논문.
42. 김학관, 강문성, 박승우, 최지용, 양희정, 2009. 다중목적 최적화 기법을 이용한 SWAT 모형 수분 매개변수의 자동보정. 한국농공학회논문집, 51(1), 1-9.
43. 김학관, 김상민, 박승우, 2006. 관계형 데이터베이스를 이용한 수문자료 관리시스템 개발. 한국수자원학회논문집, 39(10), 855-866.
44. 김현영, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생. 서울대학교 박사학위 논문.
45. 김현영, 박승우, 1986. 유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화. 한국농공학회지, 28(2), 42-52.
46. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의 (I). 한국농공학회지, 30(1), 50-62.
47. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의 (II). 한국농공학회지, 30(2), 95-104.
48. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의 (III). 한국농공학회지, 30(3), 95-105.
49. 김현영, 서영제, 최용선, 문종원, 1998. 우리나라 서남부지역 담수호의 효율적 이용방안. 한국수자원학회논문집, 31(4), 385-396.
50. 김현영, 황철상, 강석만, 이광야, 1998. 유역물수지모형(WWASS)에 의한 임의 하천 지점에서 일별 유출량의 모의발생. 한국수자원학회논문집, 31(4), 503-512.
51. 김현준, 2001. 매개변수 쌍곡선형 일유출 모형의 개발. 서울대학교 박사학위논문.
52. 남원호, 김태곤, 최진용, 이정재, 2012. 농업용 저수지 공급량과 수요량의 확률분포 및 신뢰성해석 기법을 활용한 물 공급 취약성 평가. 한국농공학회논문집, 54(2), 37-46.
53. 남원호, 최진용, 최순군, 장민원, 이남호, 고광돈, 2011. 농업용 저수지 관개용수 공급 시기 및 절수 방법 기초자료 설문조사 분석. 한국관개배수논문집, 18(1), 81-93.
54. 남원호, 최진용, 홍은미, 김진택, 2013. 농촌수자원 스마트 물관리를 활용한 농업용수의 관개효율 평가. 한국농공학회논문집, 55(4), 45-53.
55. 노영신, 2005. 영상 해석 기술을 이용한 하천 유량 측정 기법 개발. 명지대학교 토목환경공학과 박사학위논문.
56. 노재경, 2003. 용수 수요를 고려한 DAWAST 모형의 적용성 평가. 한국수자원학회

- 논문집, 36(6), 1097-1107.
57. 노재경, 이재남, 2011. 유역배출에 따른 저수지의 하천유지용수 공급량. 농업과학연구, 38 (2), 331-341.1.
 58. 농림부, 1997. 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화 연구.
 59. 농림부, 2006. 농림통계연보.
 60. 농림축산식품부, 2014. 농림축산식품통계연보.
 61. 농림축산식품부, 한국농어촌공사, 2014. 농업생산기반정비통계연보.
 62. 농어촌연구원, 2012. 농촌용수 종합시험지구 운영-수자원.
 63. 농업기반공사, 2005. 영농환경 변화를 고려한 농업용수적정 공급방안 연구.
 64. 농촌진흥청홈페이지, 2015. 농업기술정보,
<http://www.nongsaro.go.kr/portal/farmTechMain.ps?menuId=PS00002>.
 65. 류권규, 김서준, 김동수, 2014. 상호상관법을 이용한 시공간 영상유속계의 2차원 유속분포 측정. 한국수자원학회논문집, 47(6), 537~546.
 66. 박기욱, 1997. 농업용수조직내 관개단위별 용수분배의 최적화. 서울대학교 석사학위 논문.
 67. 박기욱, 2004. 물관리자동화시스템을 위한 관개조직운영모형의 개발. 서울대학교 박사학위 논문.
 68. 박승우, 1993. Tank 모형 셀프로그램을 이용한 중소하천의 일유출량 추정, 한국수문학회지, 26(3), 47-61.
 69. 박승우, 2000. 농업생태환경 모니터링 및 종합적 환경관리시스템 개발 사업. 농림부.
 70. 박승우, 2006. 비점원 오염 모델의 종류와 적용방법. 한국수자원학회논문집, 39(12), 19-26.
 71. 박윤식, 2014. 유전자 알고리즘과 회귀식을 이용한 오염부하량의 예측. 한국환경농학회지 33(1), 37-43.
 72. 박윤식, 이지민, 정영훈, 신민환, 박지형, 황하선, 류지철, 박장호, 김기성, 2015. 한강 수계에서의 부유사 예측을 위한 LOADEST 모형의 회귀식의 평가, 한국농공학회논문집, 57(2), 37-45.
 73. 박은진, 1999. 하천 수변 범람 지역에서의 질소 동태 관찰과 모형 구축. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
 74. 박재충, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일, 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가, 19(5), 465-473.
 75. 박지훈, 강문성, 송인홍, 2012. 분위사상법을 이용한 RCP 기반 미래 극한 강수량 편위의 보정; 우리나라 20개 관측소를 대상으로. 한국농공학회논문집, 54(6), 133-142.
 76. 박지훈, 강문성, 송인홍, 2013. 분위사상법을 적용한 RCP 시나리오 기반 시군별 홍수 위험도 평가. 한국농공학회논문집, 55(4), 73-82.
 77. 박지훈, 강문성, 송인홍, 황순호, 송정현, 전상민, 2013. 관계형 데이터베이스를 이용한 농업비점 자료 관리 시스템 개발. 한국농촌계획학회지, 19(4), 319-327.

78. 박진혁, 강부식, 2007. 댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교. 한국지리정보학회지, 9(3), 171-182.
79. 박진혁, 이을래, 김태국, 고익환, 2007. 홍수예측을 위한 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 1498-1502.
80. 박진혁, 코지리, 토모스기, 2003. 유역환경평가를 위한 GIS기반 분포형유출모형의 구축(일본어), 일본 수문 수자원학회논문집, 16(5), 541-555.
81. 박창언, 김진택, 오승태, 2012. 자동계측이 이루어지는 관개용수로에서의 수위-유량 관계 분석. 한국농공학회논문집, 54(1), 109-114.
82. 박창언, 박승우, 1994. 영산호 운영을 위한 홍수예보모형의 개발(I) -나주지점의 홍수유출 추정. 36(4), 95-102.
83. 서울대학교, 2014. 농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발 : 제 2 차년도 자체평가 보고서.
84. 서춘석, 2001. 관개 논에서의 영양물질 추정 모형의 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
85. 서춘석, 박승우, 김상민, 강문성, 임상준, 윤광식, 2002. 관개 논에서의 영양물질 추정 모형의 개발. 전원과자원, 44(3), 146-156.
86. 성영두, 정구열, 신철균, 박진혁, 2008. 저류함수를 이용한 일단위 장기유출모의 모형 구축. 한국수자원학회논문집, 41(7), 737-746.
87. 성장현, 김병식, 강현석, 조천호, 2012. RCP 기후변화 시나리오 기반의 미래 극한강수의 비정상성 빈도해석. 한국방재학회지, 12(2), 231-244.
88. 성충현, 2004. HEC-HMS 모형을 이용한 단위도 모형 비교연구. 서울대학교 박사학위논문.
89. 성충현, 김성재, 김성민, 김상민, 2011. 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 포장단위 수질영향 분석. 한국농공학회논문집, 53(4), 59-65.
90. 송정현, 2013. 복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의 모형의 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
91. 송정현, 강문성, 송인홍, 장정렬, 2012. 영농방법에따른 논에서의 배출부하량 모의. 한국환경농학회지, 31(4), 318-327.
92. 송정현, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 안지현, 2013. 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발. 한국농공학회논문집, 55(3), 63-73.
93. 송정현, 강문성, 송인홍, 황순호, 박지훈, 전상민, 김계웅, 장정렬, 2013. 저수지 관개 광역 논외 영양물질 수지 분석. 한국농공학회논문집, 55(6), 167-175.
94. 송정현, 송인홍, 김진택, 강문성, 2015. 연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의. 한국수자원학회논문집, 45(6), 425-438.
95. 송정현, 송인홍, 김진택, 강문성, 2015. 저수지 관개지구의 농업용수 회귀 특성 분석. 한국농공학회논문집, 57(1), 69-78.
96. 송정현, 정건희, 강문성, 2014. 최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개-MATLAB 프로그램을 중심으로-. 전원과자원, 56(2), 16-25.

97. 송정현, 정한석, 박지훈, 송인홍, 강문성, 박승우, 2014. 미처리하수지구 논에서의 수질 및 토양 특성 분석. 한국농공학회논문집, 56(6), 19-29.
98. 신민환, 서지연, 최용훈, 김종건, 신동석, 이열재, 정명숙, 임경재, 최종대, 2009. 농촌 유역의 비점원오염부하 산정을 위한 LOADEST 모델의 적용성 평가. 수질보전 한국물환경학회지, 25 (2), 212-220.
99. 신상훈, 정일원, 배덕효, 2010. SCE-UA를 이용한 Tank 모형의 최적 매개변수 추정 방안. 한국수자원학회 학술발표회.
100. 신현석, 강두기, 김상단, 2007. 낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유황분석. 한국수자원학회논문집, 40(3), 251-563.
101. 안기홍, 염경택, 반양진, 손병용, 변창영, 2009. 국내·외 저수지 수리·수질 모델의 활용현황 및 발전방향. 물과 미래, 42(8).
102. 안지현, 2013. 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발, 서울대학교 석사학위논문.
103. 안지현, 송정현, 강문성, 송인홍, 전상민, 박지훈, 2015. TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발. 한국농공학회논문집, 57(4), 121-133.
104. 엄명철, 2004. 해수담수호 유역의 시공간적 오염물질 배출구조 해석. 서울대학교박사학위논문.
105. 오승영, 김진수, 김규성, 김선중, 윤춘경, 2002. 관개기 대구획 광역논에서의 오염부하 원단위, 2002. 한국농공학회논문집, 44(2), 136-147.
106. 우재열, 김진수, 2010. 농업용저수지를 이용한 소수력의 연간발전량 추정. 한국농공학회논문집, 52 (6), 1-7.
107. 유승환, 2009. 기후변화에 따른 미래 농업가뭄 특성 분석. 서울대학교 박사학위 논문.
108. 유승환, 이상현, 최진용, 박나영, 2012. 독높이기 농업용저수지의 환경용수 방류기준 설정. 한국농공학회논문집, 54 (5), 17-24.
109. 유승환, 최진용, 장민원, 2006. 논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman 공식의 작물 계수 산정. 한국농공학회논문집, 48(1), 13-23.
110. 유전자 알고리즘 순서도, <http://www.ewh.ieee.org>.
111. 윤광식, 한국현, 조재영, 최창현, 손재권, 최진규, 2002. 양수장 지구 광역논으로부터 영농기간 영양물질의 유출 및 물질수지. 농촌계획학회지 8(1), 3-14.
112. 윤복식, 송낙운, 1995. Simulated Annealing의 효과적 변형 및 HLS에의 적용. 대한산업공학회지, 21(1), 33-49.
113. 윤용남, 2008. 수문학 기초와 응용. 청문각.
114. 이남호, 1988. 관개지구 물관리조직의 일별 모의조작. 서울대학교 박사학위 논문.
115. 이남호, 황한철, 남상운, 홍성구, 전우정, 1998. 시설농업의 용수 이용실태 조사 분석. 농촌계획 4(2): 96-102.
116. 이상윤, 2008. 동화댐의 환경용수량 산정. 건국대학교 석사학위논문.

117. 이상진, 김주철, 노준우, 2010. 대청유역 물수지 분석을 위한 장기 유출모의. 한국환경과학회지, 19(10), 1211-1217.
118. 이상현, 유승환, 박나영, 최진용, 2013. 독높이기 농업용저수지의 운영기준에 따른 환경용수 방류패턴 분석. 한국농공학회논문집, 55 (3), 51-62.
119. 이성용, 김태곤, 이제명, 이은정, 강문성, 박승우, 이정재, 2009. 단일변이 탐색법과 유전 알고리즘에 의한 탱크모형 매개변수 결정 비교 연구. 한국농공학회논문집, 51(3), 1-8.
120. 이용직, 김선주, 김필식, 주옥중, 양용석, 2006. 합리적 관개용수량 산정에 관한 연구. 한국농공학회논문집, 48(3), 11-20.
121. 이용직, 김필식, 김선주, 지용근, 주옥중, 2008. 현장 측정을 통한 관개용수로의 손실량 추정. 한국농공학회논문집 50(1): 13-21.
122. 이정범, 이재용, 이사광, 장정렬, 장익근, 김진수, 2014. 하천관개지역 광역논에서의 영양물질의 물질수지. 한국농공학회논문집 56(5), 11-19.
123. 이태호, 2011. 수리시설물 모의조작 시스템(HOMWRS) 소개 -농업용 저수지 물수지분석 프로그램-. 한국수자원학회지, 44(7), 88-91.
124. 이학수, 한지영, 김경현, 김상현, 2001. 지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석연구. 한국수자원학회논문집, 34(4), 403-414.
125. 임상준, 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 박사학위논문.
126. 임상준, 강민구, 박승우, 박창언, 2000. 한강수계 관개용 저수지의 공급량 조사, 한국농공학회논문집, 42(6), 37-44.
127. 임상준, 박승우, 2006. 농업유역의 일별 하천유출량 추정. 한국관개배수, 13(20), 86-94.
128. 임상준, 박승우, 김현준, 2000. 한강수계의 농업용수 공급량 조사방법의 개발. 한국수자원학회논문집, 33(6), 765-774.
129. 임익현, 배성환, 2015. 대기오염 모델링을 위한 기상자료 전처리 프로그램 개발에 관한 연구. 한국전자통신학회논문지, 10(1), 47-54.
130. 임창수, 2008. 증발산 산정 방법들의 비교 - 잔디기준작물을 중심으로. 한국수자원학회논문집, 41(2), 212-228.
131. 장승우, 2012. HEC-HMS 모형 매개변수에 의한 유출 불확실성 평가. 서울대학교 석사학위논문.
132. 장원석, 류지철, 강현우, 이지원, 김기성, 임경재, 2011. 효과적인 하천 오염부하량 산정 위한 NI 방법 및 ESTIMATOR, LOADEST 모형 적용 및 평가. 강원 농업생명환경연구, 23 (1), 1-10.
133. 전지홍, 윤춘경, 최진규, 윤광식, 2005. 관개방법에 따른 논에서의 수문 및 수질특성에 미치는 영향. 생태와 환경 38(1), 118-127.
134. 정상욱, 1998. 관개계획을 위한 기준작물 증발산량 산정, 한국농공학회지, 40(1),

- 43-48.
135. 정상옥, 박기중, 2004. 소규모 논지대의 관개회귀수량 실측조사 및 분석. 한국수자원학회논문집, 37(7), 517-526.
 136. 정상옥, 손성호 2001. 물수지분석 기법에 의한 논에서의 회귀율 조사분석. 전원과자연, 43(2), 59-68.
 137. 정재운, 윤광식, 최우정, 최우영, 이수형, 장남익, 홍순강, 주석훈, 2008. 논에서 영양물질 수지를 이용한 논 정화능력 분석. 한국습지학회지 10(3), 1-7.
 138. 정충길, 안소라, 김성준, 양희정, 이형진, 박근애, 2013. 벼짚 피복에 의한 밭 비점오염원 유출저감효과 분석을 위한 HSPF와 SWAT 모델링. 한국농공학회지 55(2), 47-57.
 139. 정하우, 김선주, 김진수, 노재경, 박기욱, 손재권, 윤광식, 이근후, 이남호, 정상옥, 최중대, 최진용, 2006. 관개배수공학. 동명사.
 140. 정한석, 2014. 사회-수문시스템 모델링을 이용한 하수재이용 구역의 수문특성 분석. 서울대학교 박사학위논문.
 141. 정한석, 성충현, 장태일, 정기웅, 강문성, 박승우, 2011. 하수처리수의 농업용수 재이용에 따른 논벼 수확량 모의. 한국농공학회논문집, 53(4), 67-74.
 142. 조명희, 김경준, 김현정, 2013. 선진화된 하천측량자료 활용 및 관리를 위한 하상변동 자료관리 프로그램 기반의 하도유지관리체계 개선에 관한 연구. 한국지리정보학회지, 16(3), 115-125.
 143. 조복희, 2004. 장기유출모형의 매개변수 지역화에 관한 연구, 세종대학교 석사학위논문.
 144. 조홍제, 김정식, 이근배, 2000. TOPMODEL을 이용한 장기유출 해석. 한국수자원학회논문집, 33(4), 393-405.
 145. 주옥중, 김진택, 박기욱, 이용직, 2006. 영농방식변화에 따른 논용수량 산정 시스템 개발. 한국관개배수논문집, 13(1), 82-90.
 146. 지용근, 이미선, 이진희, 장재호, 2012. 독높이기 농업용저수지의 운영을 통한 하천수질개선 효과 분석. 한국수자원학회논문집, 45 (9), 929-941.
 147. 진영민, 1998. 논 비점오염물질 배출량 추정을 위한 CREAMS-PADDY 모형의 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
 148. 진영민, 박승우, 김상민, 강문성, 강민구, 2002. CREAMS-PADDY 모형을 이용한 논에서의 영양물질 부하 추정, 농촌계획, 8(1), 60-68.
 149. 채정훈, 박문수, 최영진, 2014. WISE 복합 기상센서 관측 자료 품질관리시스템. 한국기상학회, 24(3), 445-456.
 150. 최중대, 권순국, 권기석, 2004. 점토질 롬 밭과 논 비점오염원 부하량 평가. 한국농공학회논문집 46(2), 107-114.
 151. 최중대, 최예환, 2002. 북한강 유역 춘천지역의 논 농업용수 회귀율 산정. 한국관개배수, 9(2), 68-77.

152. 최진규, 손재권, 김진택, 김영주, 2012. 동진지구 김제간선 내 주요 용수지선의 흐름 특성. 한국농공학회논문집, 54(5), 113-121.
153. 최진규, 손재권, 윤광식, 이현정, 김영주, 2012. 우분 퇴비를 사용한 논에서의 유출수 특성. 한국농공학회논문집 54(3), 29-36.
154. 최진용, 남원호, 홍은미, 이상현, 2013. 기후변화에 따른 농업수자원 수요 평가 및 대응 방안. 전원과 자원, 55(1), 14-23.
155. 최호훈, 이효상, 2012. 미호천 유역의 지역화 연구를 위한 개념적 강우유출모형의 평가. 한국방재학회지, 12(1), 193-203.
156. 추태호, 2004. 낙동강 유역의 월곡저수지 내 논 농업용수 회귀율 조사분석. 대한토목학회논문집, 24(2), 123-129.
157. 추태호, 2004. 물수지분석 기법에 의한 양수장 몽리구역내 농업용수 회귀율 연구. 한국수자원학회논문집, 37(3), 249-255.
158. 한국건설기술연구원(KICT), 2004. 지표수 조사기술 개발.
159. 한국농어촌공사, 2009. 우즈베키스탄 투자환경 조사보고서.
160. 한국농촌공사 농어촌연구원, 2005. 영농환경 변화를 고려한 농업용수 적정 공급방안 연구.
161. 한국수자원공사, 1994. 대하천 유량 자동 측정설비 개발 (2차년도). WRII-WR-94-1.
162. 한국수자원공사, 2010. 표면유속을 이용한 유량측정의 정확성 향상방안 (2차년도), KWI-WR-10-01.
163. 한국현, 2011. 관개기 곡간지 유역 필지논에서의 비점원오염물질 유출특성. 한국관개배수논문집 18(1), 94-102.
164. 한성호, 1994. 유출해석을 위한 강우-유출 모델의 적용. 강원대학교 석사학위논문.
165. 함중화, 김동환, 김형중, 김미옥, 2012. 농업용 저수지 수질모델 (ARSIM-rev) 개발 및 적용. 한국농공학회논문집, 54(6), 65-76.
166. 허유만, 박창현, 박승우, 1993. 중소유역의 일별 용수수급해석을 위한 하천망모형의 개발(I) - 중소유역의 일유출량 추정 -. 전원과자원, 35(1), 40-49.
167. 황세운, 2006. GWLF 모형을 이용한 강수량 변화에 따른 지역 비점오염 영향 분석. 서울대학교 석사학위 논문.
168. 황세운, 강문성, 2013. 기후변화 영향평가 방법론과 과정의 불확실성. 전원과 자원, 55(1), 30-39.
169. 황순호, 2012. 농업용 저수지 독높이기에 따른 하류 홍수저감효과 분석. 서울대학교 석사학위논문.
170. 황하선, 윤춘경, 전지홍, 김병희, 2002. 저장우연도 지하수 관개 필지논에서 수도재배기간 동안의 물수지. 한국농공학회지, 44(4), 39-50.
171. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Chunge, J. A., O'Connell, P. E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European hydrological system; SHE, 1:

- History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 45–59.
172. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Chunge, J. A., O' Conell, P. E., Rasmussen, J., 1986. An introduction to the European hydrological system: SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 61–77.
173. Ahmed, J. A., Sarma, A. K., 2005. Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water Resources Management*, 19(2), 145–161.
174. Ali, M. H., Shui, L. T., Walker, W. R., 2003. Optimal water management for reservoir based irrigation projects using Geographic Information System. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(1), 1–10.
175. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guideline for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, 56, United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
176. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, 300(9), D05109.
177. Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L. S., 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.*, 43(2), 1–34.
178. Anan, M., Yuge, K., Nakano, Y., Funakoshi, T., Haraguchi, T., 2004. The relationship between water intake rates, paddy ponding depth, and farmers' water management techniques. *Paddy Water Environ.* 2, 11–18.
179. Anbumozhi, V., Yamaji, E., Tabuchi, T., 1998. Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level. *Agricultural Water Management*, 37(3), 241–253.
180. Antonopoulos, V. Z., 2010. Modelling of water and nitrogen balances in the ponded water and soil profile of rice fields in Northern Greece. *Agricultural water management*, 98(2), 321–330.
181. Argent, R. M., 2006. An overview of model integration for environmental applications - components, frameworks, and semantics. *Environmental Modelling & Software*, 19, 219–234.
182. Argent, R. M., Voinov, A., Maxwell, T., Cuddy, S. M., Rahman, J. M., Seaton, S., Vertessy, R. A., Braddock, R. D., 2006. Comparing modeling frameworks - A workshop approach. *Environmental Modelling & Software*, 21, 895–910.
183. Arnold, J. G., Williams, J. R., 1987. Validation of SWRRB: Simulator for

- water resources in rural basins. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 113(2). 243–256.
184. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *J. Am. Water Resour. As.* 34(1), 73–89.
185. Ashofteh, P. S., Haddad, O. B., Mariño, M. A., 2013, Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 139(2), 85–97.
186. Aya, S., Fujita, I., Yagyu, M., 1995. Field–observation of flood in a river by video image analysis. *Proceeding of Hydraulic Engineering*, 39, 447–452. (in Japanese)
187. Barnwell, T. O., 1982. An overview of the Hydrologic Simulation Program–FORTRAN, a simulation model for chemical transport and aquatic risk assessment. *Aquatic Toxicology and Hazard Assessment.* American Society for Testing and Materials, Philadelphia, ASTM Special Technical Publication 766, 291–301.
188. Barr, R. S., Glover, F., Klingman, D., 1974. An improved version of the out–of–kilter method and a comparative study of computer codes. *Mathematical Programming*, 7(1), 60–86.
189. Beasley, D. B., Huggins, L. F., Monke, E. J., 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transaction of the ASAE*, 23(4), 938–944.
190. Bennett, D. A., 1997. A framework for the integration of geographical information systems and model base management. *International Journal of Geographical Information Science*, 11 (4), 337–357.
191. Bergstrom, S., 1995. The HBV model – Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publication*, 443–476.
192. Beven, K. J., 1989. Changing Ideas in Hydrology–The case of Physically–Based Models. *Journal of Hydrology*, 105, 157–172.
193. Beven, K. J., 2007. Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrology and Earth System Science*, 11(1), 460–467.
194. Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh, R., Raghuwanshi, N. S., 2009. Integrated reservoir–based canal irrigation model. I: Description. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 135(2), 149–157.
195. Bicknell, B. R., 1996. Hydrological simulation program–fortran (HSPF): User’ s Manual Release 11. Georgia: U.S. Environmental Protection Agency.
196. Borah, D. K., 2011. Hydrologic procedures of storm event watershed

- models: a comprehensive review and comparison. *Hydrological Processes*, 25(22), 3472–3489.
197. Bos, M. G., Nugteren, J., 1990. On irrigation efficiencies. Report 19, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Netherlands.
198. Boughton, W. C., 1984. A simple model for estimating the water yield of ungauged catchments. *Civil Engineering Transactions*, 26(2), 83–88.
199. Bras, R. L., Cordova, J. R. 1981. Intraseasonal water allocation in deficit irrigation. *Water resources research*, 17(4), 866–874.
200. Carey, R. O., Migliaccio, K. W., Brown, M. T., 2011. Nutrient discharges to Biscayne Bay, Florida: Trends, loads, and a pollutant index. *Science of the Total Environment*, 409, 530–539.
201. Carleton, C. J., Dahlgren, R. A., Tate, K. W., 2005. A relational database for the monitoring and analysis of watershed hydrologic functions: I. Database design and pertinent queries. *Computers & Geosciences*, 31(4), 393–402.
202. Carleton, C. J., Dahlgren, R. A., Tate, K. W., 2005. A relational database for the monitoring and analysis of watershed hydrologic functions: II. Data manipulation and retrieval programs. *Computers & geosciences*, 31(4), 403–413.
203. Castronova, A. M., Goodall, J. L., 2010. A generic approach for developing process-level hydrologic modeling components. *Environmental Modelling & Software*, 25(7), 819–825.
204. Castronova, A. M., Goodall, J. L., 2013. Simulating watersheds using loosely integrated model components: evaluation of computational scaling using OpenMI. *Environmental Modelling & Software*, 39, 304–313.
205. Causap, J., Qulez, D., Arags, R., 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental monitoring and assessment*, 117(1–3), 451–461.
206. Chan, F. K. S., Adekola, O., Mitchell, G., Ng, C. N., Mcdonald, A., 2013. Towards sustainable flood risk management in the Chinese Coastal Megacities. A case study of practice in the Pearl River Delta. *Irrigation and Drainage*, 62(4), 501–509.
207. Chang, F.J ., Chen, L., 1998. Real-coded genetic algorithm for rule-based flood control reservoir management. *Water Resources Management*, 12, 185–198.
208. Chang, Y. C., Chen, W. H., Lee, C. Y., Huang, C. N., 2006. Simulated annealing based optimal chiller loading for saving energy. *Journal of Energy*

- Conversion and Management, 47(15–16), 2044–2058.
209. Chapra, S. C., 1997. Surface water quality modeling. NY: McGraw–Hill.
210. Chapra, S. C., Canale, R. P., 2006. Numerical methods for engineers. McGraw–Hill.
211. Chen, L., 2003. Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation, *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5), 1157–1165.
212. Chien, C. P., Fang, W. T., 2012. Modeling irrigation return flow for the return flow reuse system in paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 10(3), 187–196.
213. Chiew, F., McMahon, T., 1994. Application of the daily rainfall–runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments, *Journal of Hydrology*, 153, 383–416.
214. Cho, J., Mostaghimi, S., 2009. Dynamic agricultural non–point source assessment tool (DANSAT): Model application. *biosystems engineering*, 102(4), 500–515.
215. Choi, J. D., Park, W. J., Park, K. W., Lim, K. J., 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. *Paddy and Water Environment*, 11(1–4), 241–248.
216. Chow, V. T., Yen, B. C., 1974. A laboratory watershed experimentation system: a contribution to the international hydrological decade. *Civil engineering studies*, Hydraulic engineering series No. 27.
217. Chowdary, V. M., Rao, N. H., Sarma, P. B. S., 2004. A coupled soil water and nitrogen balance model for flooded rice fields in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103(3), 425–441.
218. Chung, F. I., Archer, M. C., DeVries, J. J., 1989. Network flow algorithm applied to California aqueduct simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(2), 131–147.
219. Chung, S. O., Kim, H. S., Kim, J. S., 2003. Model development for nutrient loading from paddy rice fields. *Agricultural Water Management*, 62(1), 1–17.
220. Clements, P. C., 1995. From subroutines to subsystems: component based software development. *American Programmer*, 8 (11), 8.
221. Costanza, R., Voinov, A., 2003. *Spatially Explicit Landscape Simulation Modeling*. Springer–Verlag, New York.
222. Crawford, N. H., Linsley, R. K., 1966. *Digital Simulation in Hydrology*'Stanford Watershed Model 4, Technical Report, 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, CA.

223. Cuenca, R. H., 1989. Irrigation system design: an engineering approach. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, N. J., 133.
224. Das, S. K., Ng, A. W. M., Perera, B. J. C., Adhikary, S. K., 2013. Effects of climate and landuse activities on water quality in the Yarra River catchment. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia.
225. David, O., Ascough, J. C., Lloyd, W., Green, T. R., Rojas, K. W., Leavesley, G. H., Ahuja, L. R., 2013. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The Object Modeling System. *Environmental Modelling & Software*, 39, 201–213.
226. David, O., Markstrom, S. L., Rojas, K. W., Ahuja, L. R., Schneider, I. W., 2002. The object modeling system, *Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer*. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, 317–331.
227. De Vries, M. E., Rodenburg, J., Bado, B. V., Sow, A., Leffelaar, P. A., Giller, K. E., 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. *Field Crops Research*, 116(1), 154–164.
228. De Wrachien, D., Mambretti, S., Schultz, B., 2011. Flood management and risk assessment in flood-prone areas: Measures and solutions. *Irrigation and drainage*, 60(2), 229–240.
229. Dewandel, B., Gandolfi, J. M., De Condappa, D., Ahmed, S., 2008. An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. *Hydrological processes*, 22(11), 1700–1712.
230. Donigian, A. S., Imhoff, J. C., Bicknell, B. R., Kittle, J. L., 1984. Application guide for hydrological simulation program–fortran (HSPF). U.S. Envir. Protection Agency (EPA), Washington, D. C.
231. Doorenbos, J., Kassam, A. H., 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*, 33, United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
232. Doorenbos, J., Kassam, A. H., 1986. Yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Water Resources and Development Service, Rome, Italy.
233. Doorenbos, J., Pruitt, W. O., 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Water Resources and Development Service, Rome, Italy.
234. Dorigo, M., Maniezzo, V., Coloni, A., 1996. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B*:

- Cybernetics, *IEEE Transactions on*, 26(1), 29–41.
235. Dramais, D., Le Coz, J., Camenen, B. Hauet, A., 2011. Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage discharge curves. *Journal of Hydro-environment Research*, 5, 301–312.
236. Drooger, P., Bastiaanssen, W. G. M., Beyazgul, M., Kayam, K., Kite, G. W., Murray-Rust, H., 2000. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigated system in western Turkey. *Agricultural Water Management*, 43, 183–202.
237. Duan, Q. Y., Gupta, V. K., Sorooshian, S., 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), 501–521.
238. Duan, Q. Y., Sorooshian, S., Gupta, V. K., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031.
239. Dudley, N. J., Burt, O. R., 1973. Stochastic reservoir management and system design for irrigation. *Water Resources Research*, 9(3), 507–522.
240. Dudley, N. J., Howell, D. T., Musgrave, W. F., 1971. Optimal intraseasonal irrigation water allocation. *Water Resources Research*, 7, 770–788.
241. Dunn, S. M., Freer, J., Weiler, M., Kirkby, M. J., Seibert, J., Quinn, P. F., Lischeid, G., Tetzlaff, D., Soulsby, C., 2008. Conceptualization in catchment modeling: simply learning?. *Hydrological Processes*, 22, 2389–2393.
242. Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., Arabi, M., 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5), 1223–1236.
243. Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1997. Particle-image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities. *Cold Regions Science and Technology*, 26, 97–112.
244. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., Mariño, M. A., 2013. Extraction of multicrop planning rules in a reservoir system: Application of evolutionary algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 490–498.
245. Feng, Y. W., Yoshinaga, I., Shiratani, E., Hitomi, T., Hasebe, H., 2004. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system. *Agric. Water Manage.*, 68, 47–60.
246. Ferziger, J. H., Peric, M., 2002. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.
247. Food and Agricultural Organization (FAO), 2010. *STAT Database 2009*.

- Rome.
248. Foster, G. R., Lane, L. J., 1987. User requirements: USDA, water erosion prediction project (WEPP). NSERL report, 63.
 249. Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J. E., Poussin, J. C., Cecchi, P., 2015. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 152, 99–109.
 250. Fraser, E. D., Simelton, E., Termansen, M., Gosling, S. N., South, A., 2013. “Vulnerability hotspots” : Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 195–205.
 251. Fujita, I., Hara, M., Morimoto, T., Nakashima, T., 1998. Visualization and PIV measurement of river surface flow. *Proceedings of VSJ-SPIE98*, 1–7, Yokohama, Japan.
 252. Fujita, I., Kosaka, Y., Yorozuya, A., Motonaga, Y., 2013. Surface flow measurement of snow melt flood by using a far infrared camera. *Journal of JSCE, B1 (Water Resources Engineering)*, 69(4), L703–L708. (in Japanese)
 253. Fujita, I., Takehara, K., Aya, S., Sakai, N., Tamai, M., Takano, Y. Miyamoto, H., 2002. Measurement of river flow by ITV video camera. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 8, 459–464. (in Japanese)
 254. Fujita, I., Watanabe, H., Tsubaki, R., 2005. Efficient analysis method for river flow measurement using space-time images. *Proceedings of 31th IAHR Congress*, 11~16, Seoul, Korea.
 255. Georgiou, P. E., Papamichail, D. M., 2008. Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. *Irrigation Science*, 26(6), 487–504.
 256. Ghia, U., Ghia, K. N. Shin, C. T., 1982, High-Re solutions for incompressible flow using the Navier–Stokes equations and a multigrid method. *Journal of Computational Physics*. 48, 387–411.
 257. Gibbs, M. S., Maier, H. R., Dandy, G. C., 2012. Development of Decision Support Frameworks for Water Resource Management in the South East. Goyder Institute for Water Research Technical Report Series No. 12/3.
 258. Gijbbers, P. J. A., Moore, R. V., Tindall, C. I., 2002. HarmonIT: towards OMI, an open modelling interface and environment to harmonise European developments in water related simulation software. *Hydroinformatics 2002, Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK.
 259. Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R., Reddy, N. G., 2005. Return-flow

- assessment for irrigation command in the Palleru River basin using SWAT model. *Hydrological processes*, 19(3), 673–682.
260. Guariso, G., Hitz, M., Werthner, H., 1996. An integrated simulation and optimization modelling environment for decision support. *Decision Support Systems*, 16, 103–117.
261. Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O., 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143.
262. Haan, C. T., Barfield. B. J., Hayes, J. C., 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press.
263. Hargreaves, G. H., 1975. Moisture availability and crop production. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 18 (5), 980–984.
264. Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrigal Drainage*, 108, 225–230.
265. Hargreaves, G. H., Samani, Z. A., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2), 96–99.
266. HarmonIT, 2002. State of the art review: Work package 1. HR Wallingford Report SR 598, HR Wallingford Ltd.
267. Hellegers, P. J. G., Jansen, H. C., Bastiaanssen, W. G. M., 2012. An interactive water indicator assessment tool to support land use planning. *Irrigation and drainage*, 61(2), 143–154.
268. Helsel, D. R., Hirsch, R. M., 2002. *Statistical Methods in Water Resources*.
269. Heo, N., 2014. Lessons from the progress of Korea' s environmental impact assessment system in the agricultural sector. *Irrigation and Drainage*, 63(2), 241–245.
270. Heuvelmans, G., Muys, B., Feyenm, J., 2006. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*, 319, 245–265.
271. Hornberger, G. M., Beven, K. J., Cosby, B. J., Sappington, D. E., 1985. Shenandoah Watershed Study: Calibration of a Topography–Based, Variable Contributing Area Hydrological Model to a Small Forested Catchment. *Water Resources Research*, 21(12), 1841–1850.
272. Howell, T. A., 2003. Irrigation efficiency. *Encyclopedia of water science*, Marcel Dekker, New York, 467–472.
273. Hsu, K. N., Gupta, H. V., Sorooshian. S., 1995. Artificial neural network modeling of the rainfall–runoff process. *Water Resources Research*, 31(10), 2517–2530.

274. Huber, W. C., Dickinson, R. E., Barnwell, T. O., 1988. Storm water management model, version 4: User's manual. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
275. Hundecha, Y., Ouarda, T. B. M. J., Bárdossy, A., 2008. Regional estimation of parameters of a rainfall–runoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic–climatic space. *Water Resources Research*, 44, W01427.
276. Ikebuchi, S., Kojiri, T., Hagiwara, Y., Tomosugi, K., Takemon, Y., Tanaka, K., Hamaguchi, T., 2006. Water resources and environment assessment in river basin based on hydro–BEAM. *Annals of Disaster Prevention and Research Institute, Kyoto University, Uji–Shi*, 49, 113–118.
277. Im, S. J., Brannan, K. M., Mostaghimi, S., Kim, S. M., 2007. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health Part, A(42)*, 1561–1570.
278. Im, S. J., Park, S. W., Chin, Y. M., Yoon, K. S., 2000. Development of CREAMS–PADDY model. 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1–13.
279. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
280. International Commission on Large Dams (ICOLD). 2007. *Dams and the World's Water*. Paris, France.
281. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
282. Irmak, S., Allen, R. G., Whitty, E. B., 2003. Daily grass and alfalfa–reference evapotranspiration estimates and alfalfa–to–grass evapotranspiration ratios in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), 360–370.
283. Ishikawa, T., Osumi, K. Mitome, H., 2001. Water flow discharge measurement using optical flow technique. *Proceeding of the Techniques and Research, Hokuriku Regional Development Bureau*, 249–252. (in Japanese)
284. Jafari, H., Raeisi, E., Zare, M., Haghghi, A. A. K., 2012. Time series analysis of irrigation return flow in a semi–arid agricultural region, Iran.

- Archives of Agronomy and Soil Science, 58(6), 673–689.
285. James, L. D., Burges, S. J., 1982. Selection, calibration, and testing of hydrologic models. *Hydrologic modeling of small watersheds*, 5, 435–472.
286. Jamieson, P. D., Porter, J. R., Wilson, D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARCHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27, 337–350.
287. Jang, T. I., Kim, H. K., Seong, C. H., Lee, E. J., Park, S. W., 2012. Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 104, 235–243.
288. Jang, T., Kim, H., Kim, S., Seong, C., Park, S., 2011. Assessing Irrigation Water Capacity of Land Use Change in a Data-Scarce Watershed of Korea. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 445–454.
289. Jang, W. S., Moon, J. P., Kim, N. W., Yoo, D. S., Kum, D. H., Kim, I. J., Mun, Y. R., Lim, K. J., 2011. SWAT Direct Runoff and Baseflow Evaluation using Web-based Flow Clustering EI Estimation System. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 27(1), 61–72.
290. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., Jung, K. W., 2004. Model development for surface drainage loading estimates from paddy rice fields. *Paddy and Water Environment*, 3(2), 93–101.
291. Jesiek, J. B., Wolfe, M. L., 2005. Sensitivity analysis of the Virginia phosphorus index management tool. *Transactions of the ASAE*, 48(5), 1773–1781.
292. Johanson, R., Kliewer, D., 1982. Maintenance and testing of Hydrological Simulation Program-FORTRAN(HSPF) – Final Report.
293. Joo, D. S., Choi, D. J., Park, H., 2000. The effects of data preprocessing in the determination of coagulant dosing rate. *Water Research*, 34(13), 3295–3302.
294. Jung, C. G., Park, J. Y., Kim, S. J., Park, G. A., 2014. The SRI (system of rice intensification) water management evaluation by SWAPP (SWAT-APEX Program) modeling in an agricultural watershed of South Korea. *Paddy and water environment*, 12(1), 251–261.
295. Kang, M. S., Park, S. W., 2014. Combined Simulation-Optimization Model for Assessing Irrigation Water Supply Capacities of Reservoirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), 04014005 1–11.
296. Kang, M. S., Park, S. W., Lee, J. J., Yoo, K. H., 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields. *Agricultural Water Management*, 79(1), 72–92.

297. Kang, M. S., Srivastava, P., Tyson, T., Fulton, J. P., Owsley, W. F., Yoo, K. H., 2008. A comprehensive GIS-based poultry litter management system for nutrient management planning and litter transportation. *Computers and electronics in agriculture*, 64(2), 212–224.
298. Kangrang, A., Chaleeraktragoon, C., 2007. A fuzzy-GAs model for determining varied irrigation efficiency. *American journal of applied sciences*, 4(6), 339–345.
299. Karamouz, M., Araghinejad, S., 2008. Drought mitigation through long-term operation of reservoirs: case study. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(4), 471–478.
300. Kebede, S., Travi, Y., Alemayehu, T., Marc, V., 2006. Water balance of Lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of hydrology*, 316(1), 233–247.
301. Kennedy, J., Eberhart, R. C. 2001. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann.
302. Kennedy, J., Eberhart, R. C., 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, 1942–1948.
303. Khepar, S. D., Yadav, A. K., Sondhi, S. K., Siag, M., 2000. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices. *Irrigation Science*, 19(4), 199–208.
304. Kim, H. K., Jang, T. I., Im, S. J., Park, S. W., 2009. Estimation of irrigation return flow from paddy fields considering the soil moisture. *Agricultural water management*, 96(5), 875–882.
305. Kim, J. S., Oh, S. Y., Oh, K. Y., Cho, J. W. 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy and Water Environment*, 3(1), 57–62.
306. Kim, S. J., Park, G. A., Kwon, H. J., 2007. Evaluation of paddy water storage dynamics during flood period in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11(5), 269–276.
307. Kim, S. M., Park, S. W., Lee, J. J., Benham, B. L., Kim, H. K., 2007. Modeling and assessing the impact of reclaimed wastewater irrigation on the nutrient loads from an agricultural watershed containing rice paddy fields. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 42(3), 305–315.
308. Kinoshita, R., 1984. Present status and future prospects of river flow analysis by the aerial photograph. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 345(II-1), 1–19. (in Japanese)
309. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated

- annealing. *Science, New Series* 220, 671–680.
310. Knapen, R., Janssen, S., Roosenschoon, O., Verweij, P., De Winter, W., Uiterwijk, M., Wien, J. E., 2013. Evaluating OpenMI as a model integration platform across disciplines. *Environmental modelling & software*, 39, 274–282.
311. Knisel, W. G., 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report, 26.
312. Kojiri, T., Kobayashi, M., 2003. Spatial and temporal distribution of water quantity and quality with GIS-based runoff model. *Advanced in River Engineering*, 8, 431–436.
313. Krause, P., Boyle, D. P., Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
314. Kummu, M., Tes, S., Yin, S., Adamson, P., Józsa, J., Koponen, J., Richey, Sarkkula, J., 2014. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake–floodplain system. *Hydrological Processes*, 28(4), 1722–1733.
315. Laniak, G. F., Olchin, G., Goodall, J., Voinov, A., Hill, M., Glynn, P., Hughes, A., 2013. Integrated environmental modeling: a vision and roadmap for the future. *Environmental Modelling & Software*, 39, 3–23.
316. Leavesley, G. H., Markstrom, S. L., Brewer, M. S., Viger, R. J., 1996. The modular modeling system (MMS) – The physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management. *Water Air and Soil Pollution*, 90, 303–311.
317. Legates, D. R., McCabe, G. J., 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233–241.
318. Leonard, R. A., Knisel, W. G., Still, D. A., 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems, *Transaction of the ASAE*, 30(5), 1403–1418.
319. Li, X., Guo, S., Liu, P., Chen, G., 2010. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. *Journal of hydrology*, 391(1), 124–132.
320. Lin, Y., Garcia, L. A., 2012. Assessing the impact of irrigation return flow on river salinity for Colorado’ s Arkansas River Valley. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(5), 406–415.
321. Lindstrom, G., Johanson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergstrom, S., 1997.

- Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, 272–288.
322. Loague, K. M., Freeze, R. A., 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchment. *Water Resources Research*, 21, 229–248.
323. Louati, M. H., Benabdallah, S., Lebdi, F., Milutin, D., 2011. Application of a genetic algorithm for the optimization of a complex reservoir system in Tunisia. *Water Resources Management*, 25, 2387–2404.
324. Lowe, L. D., Webb, J. A., Nathan, R. J., Etchells, T., Malano, H. M., 2009. Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty. *Journal of Hydrology*, 376(1), 261–274.
325. Ludwig, F., Kabat, P., Schaik, H., Valk, M., 2009. Climate change adaptation in the water sector. 79–108, Earthscan, UK.
326. Maruyama, T., Hashimoto, I., Murashima, K., Takimoto, H., 2008. Evaluation of N and P mass balance in paddy rice culture along Kahokugata Lake, Japan, to assess potential lake pollution. *Paddy Water Environ.*, 6, 355–362.
327. Masashi, Y., Toshisuke, M., Keiji, T., Fumikazu, N., Hiroshi, T., 2014. Proposal of new return flow analysis by replacement-in-order method for paddy irrigation water. *Paddy and Water Environment*, 12(4), 425–438.
328. Maxwell, T., 1999. A paris-model approach to modular simulation. *Environmental Modelling & Software* 14, (6), 511–517.
329. Ministry of Agriculture and Forestry(MAF), 1998. *Agricultural Infrastructure Design Standards: Irrigation*.
330. Molden, D., 2007. *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute.
331. Moore, R., Gijbbers, P., Fortune, D., Gregersen, J., Blind, M., Grooss, J., Vanecek, S., 2010. *OpenMI Document Series: Scope for the OpenMI (Version 2.0)*.
332. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885–900.
333. Morse, N. B., Wollheim, W. M., 2014. Climate variability masks the impacts of land use change on nutrient export in a suburbanizing watershed. *Biochemistry* 121, 45–59.
334. Motonaga, Y., Yamamoto, T., Kuriki, M., 2015. Study about the calculation

- of river flow discharge by image analysis method using the marketed software. *New Era of River Flow Measurements*, 5, 58–63. (in Japanese)
335. Muhanna, W. A., 1994. SYMMS: a model management system that supports model reuse, sharing and integration. *European Journal of Operational Research*, 72, 214–243.
336. Nagesh Kumar, D., Raju, K. S., Ashok, B., 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2), 123–129.
337. Nam, W. H., Choi, J. Y., Hong, E. M., 2015. Irrigation vulnerability assessment on agricultural water supply risk for adaptive management of climate change in South Korea. *Agricultural Water Management*, 152, 173–187.
338. Nash, J., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290.
339. Negishi, D., Nihei, Y., Katayama, N., Kashiwada, J., 2014. Accuracy of velocity and discharge measurements by using radio current meter. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 70, I625–I630. (in Japanese)
340. Novotny, V., Olem, H., 1993. *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution*, Van Nostrand Reinhold, New York.
341. Obropta C. C., Kardos, J. S., 2007. Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid Approaches. *Journal of the AWRA*, 43(6), 1508–1523.
342. Odhiambo, L. O., Murth, V. V. N., 1996. Modeling water balance component in relation to field layout in lowland paddy fields I. Model development. *Agricultural Water Management*, 30, 185–199.
343. Oliveira, R., Loucks, D. P., 1997. Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33(4), 839–852.
344. Panigrahi, B., Panda, S. N., 2003. Optimal sizing of on-farm reservoirs for supplemental irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(2), 117–128.
345. Park, J. H., Kang, M. S., Song, I. H., 2015. Assessment of Flood Vulnerability Based on CMIP5 Climate Projections in South Korea. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 859–876.
346. Patil, M. D., Das, B. S., Bhadoria, P. B., 2011. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice. *Soil and Tillage Research*, 112(1), 66–75.

347. Pereira, A. R., Villa Nova, N. A., Pereira, A. S., Barbieri, V., 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76, 75–82.
348. Poch–Massegú, R., Jiménez–Martínez, J., Wallis, K. J., de Cartagena, F. R., & Candela, L., 2014. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in Western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management*, 134, 1–13.
349. Porter, J. W., McMahon, T. A., 1975. Application of a catchment model in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, 24, 121–134.
350. Priestley, C. H. B., Taylor, R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, 100(2), 81–92.
351. Que, Z., Seidou, O., Droste, R. L., Wilkes, G., Sunohara, M. Topp, E., Lapen, D. R., 2015. Using AnnAGNPS to Predict the Effects of Tile Drainage Control on Nutrient and Sediment Loads for a River Basin. *Journal of Environmental Quality* 44, 629–641.
352. Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2007. *Particle Image Velocimetry. Practical Guide* 2nd edition, Springer, Berlin.
353. Rahman, J. M., Seaton, S. P., Perraud, J–M, Hotham, H., Verrelli, D. I., Coleman, J. R., 2003. It's TIME for a New Environmental Modelling Framework, *Proceedings of MODSIM 2004 International Congress on Modelling and Simulation*. Townsville, Australia, 14–17 July 2003, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc, 4, 1727–1732.
354. Rao, S. S., 2009. *Engineering optimization*. John Wiley & Sons.
355. Reckhow, K. H., Coffey, S. C., Henning, M. H., Smith, K., Banting, R., 1992. *EUTROMOD: Technical guidance and spreadsheet models for nutrient loading and lake eutrophication*. School of the Environment, Duke University.
356. Reddy, M. J., Nagesh Kumar, D., 2008. Evolving strategies for crop planning and operation of irrigation reservoir system using multi-objective differential evolution. *Irrigation Science* 26(2), 177–190.
357. Reed, M., Cuddy, S. M., Rizzoli, A. E., 1999. A framework for modelling multiple resource management issues e an open modelling approach. *Environmental Modelling & Software*, 14 (6), 503–509.
358. Ripple, W., 1883. Capacity of storage reservoirs for water supply, *Proceedings of the civil engineers(Birt.)*, 71.
359. Ritchie, J., 1972. Model [or Predicting Evaporation Row Crop with Incomplete Cover. *Water resources research*.

360. Rizzoli, A. E., Davis, J. R., Abel, D. J., 1998. Model and data integration and re-use in environmental decision support systems. *Decision Support Systems*, 24, 127–144.
361. Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorensen, W., 1991. *Object-Oriented Modeling and Design*. Prentice-Hall.
362. Runkel, R. L., Crawford, C. G., Cohn, T. A., 2004. Load Estimator (LOADEST): A Fortran Program for Estimating Constituent Loads in Streams and Rivers. U.S. Geological Survey Techniques and Methods: Reston, VA, USA..
363. Sabet, M. H., Coe, J. Q., 1986. Models for water and power scheduling for the California state water project, *Journal of the American Water Resources Association*, 22(4), 587–596.
364. Schopfer, G., Yang, A., von Wedel, L., Marquardt, W., 2004. CHEOPS: A tool-integration platform for chemical process modelling and simulation. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, 6(3), 186–202.
365. Setiawan, B. I., Imansyah, A., Arif, C., Watanabe, T., Mizoguchi, M., Kato, H., 2014. SRI paddy growth and GHG emissions at various groundwater levels. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 612–620.
366. Shen, Z., Chen, L., Hong, Q., Qiu, J., Xie, H., Liu, R., 2013. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area. *Science of the Total Environment* 454–455, 383–392.
367. Shon, B., 1998. Effects of carbon, nitrate, and moisture on denitrification in riparian soil of Yangjae stream. M. S. Thesis. Seoul National University.
368. Simonovic, S. P., 1992. Reservoir system analysis : Closing cap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), 262–280.
369. Singh, J., Knapp, H. V., Demissie, M., 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. Illinois State Water Survey, Champaign, Ill.
370. Singh, V. P., 1995. Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources publication, Colorado, 367–394.
371. Sloan, P. G., Morre, I. D., Coltharp, G. B., Elgel, J. D., 1983. Modling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersed. Water Resources Institute, Report 142, University of Kentucky, Lexington.
372. Song, J. H., Ryu, J. H., Park, J., Jun, S. M., Song, I., Jang, J., Kim, S. M.,

- Kang, M. S., 2015. Paddy field modelling system for water quality management. *Irrigation and Drainage* (Under review).
373. Srivastava, P., Migliaccio, K. W., Simunek, J., 2007. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. *Transaction of the ASABE*, 50(5), 1683–1693.
374. Stahre, P., Urbonas, B., 1990. Stormwater detention: For drainage, water quality, and CSO management. Food and Agricultural Organization (FAO).
375. Stanford, G., Smith, S. J., 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science of America Proceedings*, 36, 465–472.
376. Stedinger, J. R., Vogel, R. M., Foufoula-Georgiou, E., 1993. Chapter 18: Frequency analysis of extreme events. *Handbook of Hydrology*, Maidment, D. R. (editor in chief), McGraw-Hill.
377. Stenback, G. A., Crumpton, W. G., Schilling, K. E., Helmers, M. J., 2011. Rating curve estimation of nutrient loads in Iowa rivers. *Journal of Hydrology*, 396, 158–169.
378. Storm, D. E., Dillaha, T. A., Mostaghimi, S., Shanholtz, V. O., 1988. Modeling phosphorus transport in surface runoff. *American Society of Agricultural Engineers*, 31(1), 117–127.
379. Sugawara, M., 1961. On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers, *Jap. Jour. Geophys* 2(4): 1–76.
380. Sugawara, M., 1972. A method for runoff analysis, Kyoritsu Shuppan Press, Tokyo (in Japanese).
381. Sugawara, M., 1995. Tank model. Computer models of watershed hydrology, V. P. Singh, ed. Water Resource Publications, Littleton, Colo.
382. Suresh, K. R., Mujumdar, P. P., 2004. A fuzzy risk approach for performance evaluation of an irrigation reservoir system. *Agricultural water management*, 69(3), 159–177.
383. Sydelko, P. J., Majerus, K. A., Dolph, J. E., Taxon, T. N., 1999. A dynamic object-oriented architecture approach to ecosystem modeling and simulation, *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference: Portland, OR, USA*,
384. Takeda, I., Fukushima, A., 2006. Long-term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system. *Water research*, 40(3), 569–578.
385. Takehide, H., Kimihito, N., Shigeto, K., Ryoichi, K., Toru, M., 2011. Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field. *Ecological Engineering*, 37, 1563–1566.

386. Tanny, J., Cohen, S., Assouline, S., Lange, F., Grava, A., Berger, D., Teltch, B., Parlange, M. B., 2008. Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. *Journal of Hydrology*, 351(1), 218–229.
387. The Visualization Society of Japan, 2002. Handbook of visualization,
388. Tim, U., 1995. Emerging technologies for hydrologic and water quality modeling research. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 465.
389. Todini, E., 1996. The ARNO rainfall–runoff model. *Journal of Hydrology*, 175, 339–382.
390. Tournebize, J., Watanabe, H., Takagi, K., Nishimura, T., 2006. The development of a coupled model (PCPF–SWMS) to simulate water flow and pollutant transport in Japanese paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 4(1), 39–51.
391. Tsubaki, R., Fujita, I., Yu, K., Muste, M., 2015. Development of LSPIV system utilizing smartphone. *New Era of River Flow Measurements*, 5, 38–42. (in Japanese)
392. U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC5 user's Manual 8.0.
393. U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC–RAS River Analysis System user's Manual 4.1.
394. U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. Hydrologic Modelling System HEC–HMS user's manual version 3.5.
395. U. S. National Weather Service Office of Hydrology, 1972. National weather service river forecast system forecast procedures, NOAA Tech, Mem, NWS HYDRO–14.
396. UN–Water, 2007. World Water Day 2007: Coping with water scarcity – Challenge of the twenty–first century. UN–Water, UN.
397. USACE, 1991. SSARR User manual. North Pacific Div., Portland.
398. USACE, 1998. HEC–5 Simulation of Flood Control and Conservation Systems. Institution for Water Resources Corps of Engineers.
399. USBR, 1983. HYDROSS–Hydrological River Operation Study System, User' s Guide. U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation.
400. USDA–NRCS, 2004. Prt 630: Hydrology. Chapter 10: Estimation of direct runoff from strom rainfall: Hydraulics and Hydrology: Technical references. In NRCS National Engineering Handbook. Washington, D. C.: USDA National Resources Conservation Service.
401. USEPA, 2008. Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters, Chapter 8. Estimate pollutant loads. EPA 841–B–08–002.
402. Vedula, S., Kumar, D. N., 1996. An integrated model for optimal reservoir

- operation for irrigation of multiple crops. *Water Resources Research*, 32(4), 1101–1108.
403. Venkataraman, P., 2009. *Applied optimization with MATLAB programming*. John Wiley & Sons.
404. Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24 (10), 1209–1222.
405. Walker, W. W., 1996. *Simplified Procedures for Eutrophication Assessment and Prediction: User Manual*. Waterways Experiment Station, USACE.
406. Wang, H. W., Yang, C. Y., Kuo, P. H., 2013. Application of a decision support system to sustainable lowland planning and management in Yunlin area, Taiwan. *Irrigation and Drainage*, 62(S1), 82–91.
407. Whelan, G., Castleton, K. J., Buck, J. W., Hoopes, B. L., Pelton, M. A., Strenge, D. L., Gelston, G. M., Kickert, R. N., 1997. *Concepts of a framework for risk analysis in multimedia environmental systems*, Pacific Northwest National Laboratory: PNNL-11748.
408. Williams, J. R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: *Present and Prospective Technology for predicting Sediment Yield and Sources*. U.S. Department of Agriculture, ARS-S-40, 244–252.
409. Williams, J. R., 1977. Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *IAHS Publ*, 122, 168–179.
410. Willmott, C. J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194.
411. Wischmeier, W. H., Smith, D. D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning*. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning.
412. Woolhiser, D. A., Smith, R. E., Goodrich, D. C., 1990. *KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual*. ARS 77. Fort Collins, Colo.: USDA Agricultural Research Service.
413. Wu, Y., Chen, J., 2012. An operation-based scheme for a multiyear and multipurpose reservoir to enhance macroscale hydrologic models. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 270–283.
414. Wu, Y., Chen, J., 2013. Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: a case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China. *Agricultural water management*, 116, 110–121.

415. Yakimenko, O. A., 2011. Engineering computations and modeling in MATLAB/SIMULINK. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia.
416. Yamaguchi, T., Niizato, K., 1994. Flood discharge observation using radio current meter. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 497(II-28), 41-50. (in Japanese)
417. Yeh, W. W-G., 1985. Reservoir Management and Operation Models : A State-of-Art Review, *Water Resources Research*, 21(12), 1797-1818.
418. Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., Nishimura, H., 2001. Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. *Journal of Hydrology*, 246, 209-222.
419. Yoo, S. H., Choi, J. Y., Jang, M. W., 2008. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural water management*, 95(7), 845-853.
420. Yoo, S. H., Choi, J. Y., Lee, S. H., Oh, Y. G., Yun, D. K., 2013. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. *Agricultural Water Management*, 117, 43-54.
421. Yoon, C. G., Ham, J. H., Jeon, J. H., 2003. Mass balance analysis in Korean paddy rice culture. *Paddy and Water Environment*, 1(2), 99-106.
422. Yoon, K. S., Cho, J. Y., Choi, J. K., Son, J. G., 2006. Water management and N, P losses from paddy fields in Southern Korea. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), 1205-1216.
423. Yoshinaga, I., Miura, A., Hitomi, T., Hamada, K., Shiratani, E., 2007. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period. *Agricultural Water Management*, 87, 217-222.
424. Young, A. R., 2006. Stream flow simulation within UK ungauged watersheds using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, 155-172.
425. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., Anderson, W. P., 1987. Agricultural Non-Point Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool. AGNPS, USDA Conservation Research Report No. 35.
426. Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., Anderson, W. P., 1989. AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. Soil Water Conserv. Soc.* 44(2), 164-172.
427. Yu, K., 2004. Particle tracking of suspended-sediment velocities in open-channel flow. Ph. D. thesis, University of Iowa, Iowa City, Iowa.
428. Yu, K., Cho, W. S., 2014. Real-time surface image velocimeter using a

- smartphone. Proceeding of 19th IAHR–APD Congress, 210–211.
429. Yu, K., Yoon, M., 2015. Development of new surface image velocimeter based on far–infrared cameras. Proceeding of New Developments in IT & Water Conference, International Water Association, Rotterdam, The Netherlands.
430. Zeigler, B. P., 1990. Object Oriented Simulation with Hierarchical Modular Models, Academic Press, San Diego, 1995.
431. Zhang, P., Liu, Y., Pan, Y., Yu, Z., 2013. Land use pattern optimization based on CLUE–S and SWAT models for agricultural non–point source pollution control. *Mathematical and Computer Modelling* 58, 588–595.
432. Zhao, R. J., Liu, X. R., 1995. The Xinanjiang model – Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publication*, 215–232.
433. Zhou, Y., Guo, S., 2014. Risk analysis for flood control operation of seasonal flood–limited water level incorporating inflow forecasting error. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 1006–1019.
434. Zulu, G., Toyota, M., Misawa, S., 1996. Characteristics of water reuse and its effects on paddy irrigation system water balance and the riceland ecosystem. *Agricultural Water Management*, 31(3), 269–283.

〈첨부 I〉 특허, 논문 및 시장 분석 보고서

제 1 절 본 연구관련 국내외 기술수준 비교

농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발, 농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발 등 본 연구와 관련된 기술의 최고보유국은 미국이다. 본 연구의 시작 시점에 있어 미국 대비 우리나라의 기술수준은 80% - 85% 수준이었으며, 본 연구를 통해 기존에 목표했던 90% 수준의 기술수준을 달성하였다.

〈표 첨부 I-1〉 본 연구과제를 통한 기술 달성 수준

개발기술명	관련기술 최고보유국	기존 기술수		본 과제 달성수준	비고
		우리나라	연구신청팀		
농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발	미국	80%	80%	90%	
농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발	미국	85%	85%	90%	

제 2 절 특허분석

1. 특허분석 범위

농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발, 농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발 등 본 연구와 관련된 특허분석을 실시하였다. 검색 DB는 특허정보원 DB(www.kipris.or.kr)을 이용하였고, 대상국가는 국내와 국외(미국, 일본, 유럽, 중국)으로 구분하였다. 검색기간은 최근 5년, 검색범위는 제목 및 초록으로 제한하였다.

〈표 첨부 I-2〉 특허 검색 기간 및 범위

대상국가	국내, 국외(미국, 일본, 유럽, 중국)
특허 DB	특허정보원 DB(www.kipris.or.kr)
검색기간	최근 5년간
검색범위	제목 및 초록

2. 특허분석에 따른 본 연구과제와의 관련성

본 연구와 관련된 특허분석 결과, 농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발과 관련된 특허는 국내 265건, 국외 55,001건이 검색 되었다. 이중 실제 본 연구와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되는 특허는 약 25건이었다. 본 연구와 가장 유사한 핵심특허는 ‘수리 시설물 관리를 위한 다기능 물관리자동화시스템’으로, 발명을 통해 재난 재해에 대비하거나 과학적이고 체계적인 용수공급 수행이 가능하다는 공통점을 가지고 있었다. 하지만 본 연구에서는 기존의 시스템에 비해 보다 장기적인 홍수방어 및 용수공급 계획 수립이 가능하다는 장점을 가진다.

농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발과 관련된 특허는 국내 166건, 국외

25,606건이 검색되었으며, 이중 실제 본 연구와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되는 특허는 약 15건이었다. 본 연구와 가장 유사한 핵심특허는 ‘농업용수 활용을 위한 지하수 관정 통합운영관리시스템 및 방법’으로, 의사결정지원시스템을 통해 합리적인 농업용수 공급 및 배분을 수행한다는 유사점을 가지고 있다. 하지만 본 연구는 지하수뿐만 아니라 용수구역, 상·하류지역 분석에 의사결정지원시스템을 도입해 종합적인 농촌용수관리시스템을 구축한다는 차이점을 가지고 있다.

<표 첨부 I -3> 특허 검색 결과

개발기술명	농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발	농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발
Keyword	물관리시스템	농촌용수
검색건수	국내: 265, 해외: 55,001	국내: 166, 해외: 25,606
유효특허건수	25	15
핵심특허 및 관련성	특허명	수리시설물 관리를 위한 다기능 물관리자동화시스템
	보유국	대한민국
	등록년도	2014
	관련성 (%)	65
	유사점	발명을 통해 재난 재해에 대비하거나 과학적이고 체계적인 용수공급 수행이 가능함
차이점	기존의 시스템 보다 비교적 장기적인 홍수방어/용수공급 계획 수립에 활용이 용이함	
		농업용수 활용을 위한 지하수 관정 통합운영관리시스템 및 방법
		대한민국
		2015
		65
		의사결정지원시스템을 통해 합리적인 농업용수 공급 및 배분을 수행함
		지하수뿐만 아니라 용수구역, 상·하류지역 분석에 의사결정지원시스템을 도입해 종합적인 농촌용수관리시스템 구축

제 3 절 논문분석

1. 논문분석 범위

농촌 유역 종합 물 순환 모형 개발, 농촌용수 통합관리 의사결정 지원 시스템 개발 등 본 연구와 관련된 논문분석을 실시하였다. 검색 DB는 RISS (국내 학위논문 및 학술논문, 연구보고서 제공), Web of Science (SCIE 등재 저널수록), SCOPUS (전주체 분야 우수 학술저널 21,000여종 수록), ASCE (미국토목학회에서 발행하는 학술지 35종과 Proceedings 제공) 및 Agricola, Cab Abstract (농학 관련 분야 저널수록)를 이용하였으며, 검색기간은 최근 3년, 검색범위는 제목 및 초록 및 키워드로 제한하였다.

<표 첨부 I -4> 논문 검색 기간 및 범위

대상국가	미국, 일본, 유럽 등
논문 DB	RISS, Web of Science, SCOPUS, ASCE, Agricola, Cab Abstract
검색기간	최근 3년간
검색범위	제목, 초록 및 키워드

2. 논문분석에 따른 본 연구과제와의 관련성

본 연구와 관련된 논문분석 결과, 수만 건의 논문이 검색되었으며, 이중 실제 본 연구와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되는 논문 <표 첨부 I-5>와 같으며, 핵심 인용 문헌으로 이용되었다.

<표 첨부 I -5> 대표 해외 논문

1. Castronova, A. M., Goodall, J. L., 2013. Simulating watersheds using loosely integrated model components: evaluation of computational scaling using OpenMI. *Environmental Modelling & Software*, 39, 304-313.
2. Chan, F. K. S., Adekola, O., Mitchell, G., Ng, C. N., McDonald, A., 2013. Towards sustainable flood risk management in the Chinese Coastal Megacities. A case study of practice in the Pearl River Delta. *Irrigation and Drainage*, 62(4), 501-509.
3. Choi, J. D., Park, W. J., Park, K. W., Lim, K. J., 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. *Paddy and Water Environment*, 11(1-4), 241-248.
4. David, O., Ascough, J. C., Lloyd, W., Green, T. R., Rojas, K. W., Leavesley, G. H., Ahuja, L. R., 2013. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The Object Modeling System. *Environmental Modelling & Software*, 39, 201-213.
5. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., Mariño, M. A., 2013. Extraction of multicrop planning rules in a reservoir system: Application of evolutionary algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 490-498.
6. Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J. E., Poussin, J. C., Cecchi, P., 2015. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 152, 99-109.
7. Fraser, E. D., Simelton, E., Termansen, M., Gosling, S. N., South, A., 2013. "Vulnerability hotspots": Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 195-205.
8. Heo, N., 2014. Lessons from the progress of Korea's environmental impact assessment system in the agricultural sector. *Irrigation and Drainage*, 63(2), 241-245.
9. Kang, M. G., Park, S. W., 2014. Combined Simulation-Optimization Model for Assessing Irrigation Water Supply Capacities of Reservoirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(5), 04014005 1-11.
10. Knapen, R., Janssen, S., Roosenschoon, O., Verweij, P., De Winter, W., Uiterwijk, M., Wien, J. E., 2013. Evaluating OpenMI as a model integration platform across disciplines. *Environmental modelling & software*, 39, 274-282.
11. Kumm, M., Tes, S., Yin, S., Adamson, P., Józsa, J., Koponen, J., Richey, Sarkkula, J., 2014. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake-floodplain system. *Hydrological Processes*, 28(4), 1722-1733.
12. Wu, Y., Chen, J., 2013. Estimating irrigation water demand using an improved method and optimizing reservoir operation for water supply and hydropower generation: a case study of the Xinfengjiang reservoir in southern China. *Agricultural water management*, 116, 110-121.
13. Zhou, Y., Guo, S., 2014. Risk analysis for flood control operation of seasonal flood-limited water level incorporating inflow forecasting error. *Hydrological Sciences Journal*, 59(5), 1006-1019.

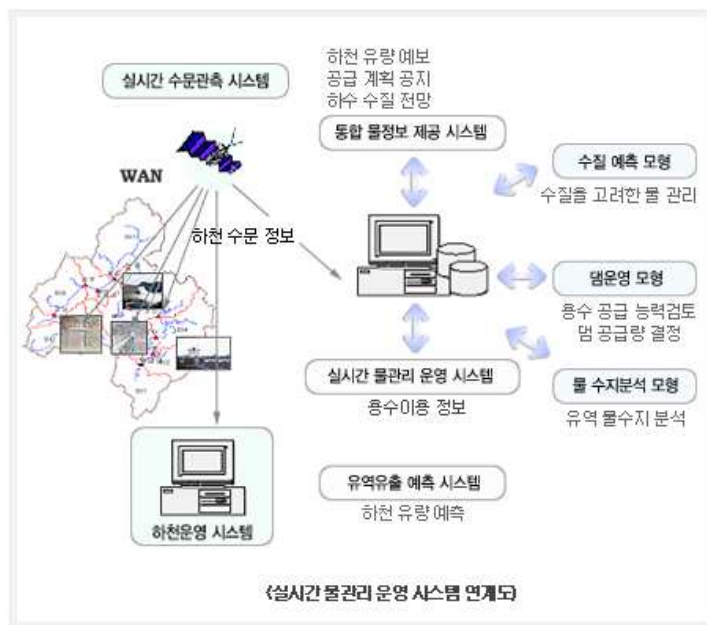
제 4 절 제품 및 시장 분석

1. 생산 및 시장현황

1.1. 국내 제품생산 및 시장 현황

우리나라에서는 1990년대부터 기상청을 중심으로 기후 변화에 대한 관심을 갖기 시작하였으며, 이후 한국수자원학회를 중심으로 우리나라 기후변화와 수자원과의 관계를 분석한 연구가 많이 수행되었음. 2012년에는 IPCC의 AR5 보고서의 RCP 시나리오에 기초하여 미래기후변화를 일단위로 12.7 km 해상도로 우리나라 전체를 대상으로 국가 기후변화 표준시나리오를 구축하여 발표를 준비 중에 있다.

과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 사업의 “수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업단 (www.water21.re.kr)”의 세부과제인 통합수자원 관리기술 개발에서 기후 변화에 의한 한반도 수자원 영향 평가에 대한 연구를 진행하고 있으나 대부분의 연구결과는 대유역과 대규모의 다목적댐을 대상으로 하고 있으며, 농업 수자원 같이 전국적으로 분포하면서 농업 생산력과 직접 관련이 있는 농업용 수자원에 대하여는 연구가 부족한 상황이다.



(그림 첨부 I-1) 실시간 물관리 운영시스템 모델 연계도

2004년 정부 합동으로 2020년 까지 비점오염원 관리를 포함하는 ‘4대강 비점오염원 관리종합대책’이 본격적인 국가의 비점오염원 관리대책으로 제시됨 (환경부, 2007). 정부는 비점오염원의 적극적인 관리를 위해 ‘비점오염원 관리요령’ 등을 작성하여 적극적인 교육과 홍보 등을 지속적으로 추진하고 있다.

현재까지 농촌 유역의 오염원 조사와 비점오염원 모니터링 및 모델링을 통한 비점오염원 배출부하량을 추정하여 하천수질을 추정하고 저감방안 등의 적용성 및 응용성을 평가하고 있는 실정임. 그러나, 농촌 유역의 기후변화 및 토지이용 등의 여건 변화에 따른 현장 실증의 종합적인 비점오염원 관리방안 수립이 미흡한 실정이다.

<표 첨부 I -6> 분야별 현 기술수준 (한국산업기술진흥원, 2009)

기술명	기술의 수명주기상 위치	경쟁국 대비 기술수준	지적재산권 보유
기후변화 평가/예측/적응	도입기	일본, 미국, EU 대비 40% 수준	외국기술 도입 후 국내 특성 고려 개발
수문/수질 모니터링	도입기 (센서 기술은 높은 편)	세계 최고 수준의 70% 수준	다양한 원천 기술 관련 특허 보유한 업체 존재
하천환경 조사/평가	도입기	미국, 일본 대비 40% 수준	국내 특허 다수 보유 국제 분쟁 회피 가능
가뭄, 홍수 대응	도입기-성장기	미국, 일본 대비 70% 수준	국가별 수자원 특성 다름 국가별 특성 반영 기술
농업용수 관리시스템	도입기 수요의 한계	미국, 일본 대비 80% 수준	지적 재산권 국내 일부 보유 국가별 특성 반영 기술
농업수리시설 개선	도입기 수요의 한계	미국, 일본 대비 70% 수준	국가별 수자원 특성 다름 국가별 특성 반영 기술

2009년 한국산업기술진흥원에서 개최된 녹색산업 부품·소재 경쟁력 확보를 위한 기획회의에서 제시된 첨단수자원의 시장성 평가 결과는 <표 첨부 I -7>과 같다.

<표 첨부 I -7> 첨단 수자원 분야별 시장규모 및 변화 추이 (한국산업기술진흥원, 2009)

기술명	시장성장률	세계시장 점유율	수입대체를
기후변화 평가/예측/적응	-전 세계적인 이슈로서 시장성장률이 매우 큼 -일본, 미국, EU 등 선진국 중심에서 개발도상국으로 시장 확대 전망	국내기술 확립 시 중국을 포함한 동남아시아 및 개도국 수출이 가능	전체 국산화 가능
수문/수질 모니터링	센서 관련 시장은 세계적으로 년5% 이상의 성장률 예측	환경 분야 센서 시장은 일본이 50% 이상의 점유율 유지	수입 대체 가능성은 매우 높으나 후발 및 중소기업이라는 취약적으로 수입 대체를 위한 시간 필요
하천환경 조사/평가	중앙정부 및 지자체 사업 비율 매년 50%이상 성장 예상	세계적으로 유역화 관리 사업의 20% 이상이 대체 예상	국내 유역화 관리 기술의 80% 이상이 미국 기술 모방
가뭄, 홍수 대응	이상홍수로 인해 전 세계적으로 홍수예경보 및 관리 기술 시장 확대 중	국내기술개발로 동남아시아 및 개도국 수출이 가능	전체 국산화 가능
농업용수 관리시스템	초기시범 사업단계, 농업용수 현장계측, 관리시스템 분야의 시설, 장비 기술의 수요가 크게 증가 예상.	미국과 일본의 시장 주도, 아시아/태평양 지역, 유럽 시장의 성장으로 지역적으로 고른 분포 예상	농업용수 현장계측 및 관리시스템 기술은 국내의 선진 정보통신 기술과 융합하여 독자적으로 개발이 가능
농업수리시설 개선	제품화시장이 빠르게 형성, 초기시범 사업단계, 농업수리시설 개선 분야의 시설, 장비 기술의 수요 크게 증가 예상	미국과 일본의 시장 주도, 아시아/태평양 지역, 유럽 시장의 성장으로 지역적으로 고른 분포 예상	일부 선진기술의 도입이 예상되지만 국내 농업수리시설 개선 기술은 독자적으로 개발이 가능

1.2. 국외 제품생산 및 시장 현황

국외의 기후변화 관련 연구는 여러 분야에서 다양하게 이루어지고 있으며 기후변화 관련 연구는 전지구기후변화 모델의 운영을 통한 미래 기후 변화를 예측하는 연구를 중심으로 기후 변화 모델의 결과를 활용하여 산업별 또는 연구 분야에 따른 영향을 평가하는 방식으로 이루어지고 있다.

미국의 경우에는 오염물질 배출부하의 약 65 %가 비점형태로 배출되는 것으로 알려짐 (USEPA, 1989). 외국의 많은 연구자들이 유역의 비점관리를 위한 비점오염원 모형을 개발연구를 수행하고, 비점오염관리방안 및 최적관리기법 등의 다양한 응용성을 제안하였으며, Borah and Bera (2003, 2004), Srivastava et al. (2007), 그리고 USEPA (2008) 등은 주요 비점오염모형의 종류 및 특징, 적용 및 평가, 최근 연구동향 및 사례를 잘 소개하고 있다.

2005년 현재 세계 산업서비스 시장 규모는 연간 4,250억 달러에서 5천억 달러 정도로 추산되고 있음. 이 중 물관리 서비스가 800억 달러에서 1,050억 달러 정도로 파악되고 있음. 산업체 내부 물관리 아웃소싱 시장 규모는 18억 달러에서 24억 달러 수준으로 2001년 이후 연가 15%에서 20%씩 빠른 성장을 하고 있다.

세계 물공급 시장 연간 투자비중 농업용수는 300억불에 달하며, 전체 수자원의 17%의 시장을 구성하고 있음. 개도국의 물분야 투자 수요에서도 농업용수 부분이 325억불로 전체의 40%이상을 차지하고 있다.

<표 첨부 I -8> 세계 물공급 시장 연간 투자비 소요액 및 투자재원 (Cosgrove and Rijsberman, 2000)

구분	연간 투자비(십억\$)		구성비(%)		
	1995	2025	1995	2025	
농업용수	30~35	30	43~50%	17%	
환경 및 공업용수	10~15	70	13~21%	41%	
상하수도	30	75	38~43%	41%	
계	70~80	180	100%	100%	
투자비 원천	- 국내공공부분	45~55	58~71	25	
	- 국내민간부분	12~15	90	15~21	45
	- 해외민간부분	4	48	5~6	24
	- 해외기부자	9	12	12~13	6

<표 첨부 I -9> 개발도상국의 연간 물분야 투자수요 (2002~2025년) (※ 자료 : World Water Council 외, "Financing Water For All", 2003. 3)

구분	1999년	2002년~2025년
합 계	750억불	1,800억불
수돗물 공급	130억불	130억불 (이상)
기초 위생설비	10억불	170억불
하수 처리	140억불	700억불
산업폐수 처리	70억불	300억불
농업용수	325억불	400억불
환경보호	75억불	100억불

2. 개발기술의 산업화 방향 및 기대효과

2.1. 산업화 방향(제품의 특징, 대상 등)

기후변화 대처를 위한 농어촌 수자원 종합해석기술 개발로 국제사회 노력을 선도할 수 있는 농촌녹색성장 원천기술 확보에 기여하고, 이에 따른 농업 생육환경, 농촌 수자원 및 환경, 농업경제 부분에 대한 신뢰성 있는 분석 기반을 조성함으로써 지속가능 농업 달성에 기여한다.

농촌대체수자원 통합기술을 개발하여 친환경 농업생산기반정비사업 및 재이용시범사업 등 기술협약 및 기술지원을 통한 수익 창출. 특히 우리나라가 OECD DOC 가입을 통한 국제원조 규모의 지속적 확대에 따른 KOICA 사업 등 국제 원조 사업에서 기존의 관개배수 위주로 Hardware 위주의 사업에서 농촌용수의 종합해석을 위한 Software 수출 및 기술의 원조가 가능할 것이다.

농촌대체수자원 통합기술 및 적용을 통해 농업용수 수질보전과 농촌지역 하천유지용수활용 등 기술의 지적재산권 확보 및 실용화/산업화가 기대됨. 또한 외국의 수입기술에 대한 대체 효과뿐만 아니라 농업용수의 대체용수개발에 환경분야 산업의 활성화가 기대된다.

농업 생육환경 변화, 농업수자원 및 농업 교역에 대한 정책 및 대책 수립에 활용이 가능하며, 농촌수자원/환경 대책, 수리 및 환경 시설물 설계 기준 정립 및 계획 등의 정책 수립에 활용이 가능함. 또한 지구 온난화 대응 농업수자원 및 수환경 관련 학술 교류나 관련 연구 분야의 활성화에 활용이 가능할 것이다.

효율적인 농업용수 관리방안 수립을 위한 요소기술개발로 대체용수개발에 기여할 것으로 예상되고, 대체수자원 활용 시범사업을 통해, 정책적인 활용기반 조성에 활용이 가능함. 또한 우리나라 농촌의 특성과 지역적 기상 및 지형 조건 등에 적합한 모델 개발을 통하여 한국 농촌형 모델을 개발할 수 있다.

2.2. 산업화를 통한 기대효과

산업화를 통한 기대효과를 직접 경제효과, 경제적 파급효과, 그리고 부가가치 창출액 등으로 구분하여 분석하였으며, 그 결과는 <표 첨부 I -10 >과 같다.

<표 첨부 I -10> 산업화를 통한 기대효과 (단위 : 백만원)

산업화 기준 항 목	산업화 기준					계
	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	
직접 경제효과	50	70	100	120	150	490
경제적 파급효과	250	300	350	400	450	1,750
부가가치 창출액	300	350	400	450	450	1,950
합 계	600	730	850	970	1,050	4,200

- 1) 직접 경제효과 : 본 연구과제 개발기술의 산업화를 통해 기대되는 제품의 매출액 추정치
- 2) 경제적 파급효과 : 본 연구과제 개발기술의 산업화를 통한 농가소득효과, 비용절감효과 등 추정치
- 3) 부가가치 창출액 : 본 연구과제 개발기술의 산업화를 통해 기대되는 수출효과, 브랜드가치 등 추정치

제 5 절 3P (특허,논문,제품)분석을 통한 연구추진계획

1. 분석결과 향후 연구계획 (특허, 논문, 제품 측면에서 연구방향 제시)

1.1. 특허분석 측면

기존 특허는 주로 물관리 자동화를 통한 홍수 등 자연재해 대비 및 현황 분석 분야에 치중되어 있으므로, 본 연구과제에서는 기후변화, 수질 등을 종합해석 할 수 있고, 또한 농촌 수자원뿐 아니라 주변환경에 대한 종합적인 해석이 가능한 종합해석 기술 구축방향으로 연구를 추진하여 농촌용수 주요 요소별 해석 기술 및 모듈개발, 요소기술간의 융합 분석 기술 관련 특허 등을 국내 및 국외에 출원할 계획이다.

1.2. 논문분석 측면

기존 논문은 대부분 도시지역을 대상으로 한 물관리 연구 분야에 치중되어 있으므로, 본 연구과제에서는 광범위한 토지이용을 기반으로 하는 농촌지역의 수자원 관리 종합해석 모형 및 의사결정지원 기술 개발 방향으로 연구를 추진하여 농촌용수 종합해석 기술, 농촌용수 종합정보 시스템 연계기술 등에 관한 논문을 Journal of Hydrology, Transactions of the ASABE, Agricultural water management, 한국농공학회, 물환경학회 등 국내외 저명 학술지 등에 게재할 계획이다.

1.3. 제품 및 시장분석 측면

국내 및 국외시장 분석결과 기존의 농촌 용수관련 사업의 경우 대부분 관개시설, 저수지 축조 등 하드웨어 위주의 제품 등의 생산 및 판매, 국제 원조가 이루어지고 있으나, 보다 효과적인 사업성과의 달성을 위해서는 소프트웨어적인 기술의 뒷받침이 필요하며, 본 연구과제에서는 농촌용수의 하드웨어 기술 뿐 아니라 이를 종합적으로 해석하고 그 영향을 평가할 수 있는 소프트웨어적 기술의 개발방향으로 연구를 추진하여 수문, 수질, 생태 등 농촌용수 관련 주요 요소들에 대한 종합적인 해석이 가능한 제품 등을 생산하여 국내 및 국외에 판매 및 원조할 계획이다.

첨부 II

COMFARM PLATFORM DOCUMENTATION

VERSION 2015

August, 2015



서울대학교

CHAPTER 1

OVERVIEW

1.1 COMFARM 개요

물순환 과정은 지역적 조건에 따라 다르게 나타나며, 이에 따라 모의 요소와 해석 기법도 다르다. 기 개발된 국내외 모형이나 시스템은 우리나라 기후변화 및 영농의 특이성, 다양화, 복잡화를 해석하는데 한계가 있다. 우리나라 농업 유역은 논, 용·배수로, 그리고 농업용 저수지가 존재하며, 이는 국외에서 개발된 모형의 지역·환경적 조건과 다르다. 또한, 논 및 저수지에서의 물관리 방식 등 인위적 요소 또한 국외 조건과 다르다. 이와 같이 농촌용수 해석이 직면하는 문제의 복잡성은 광범위한 요소가 포함되어 있어 가중되고 있으며, 지역적으로 그 특성에 따라 발생하는 문제도 굉장히 국부적으로 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 하나의 독립적인 객체로 모듈화하여 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 맞춤형 모형 형태의 객체지향 모델링 시스템 구축이 필요하다.

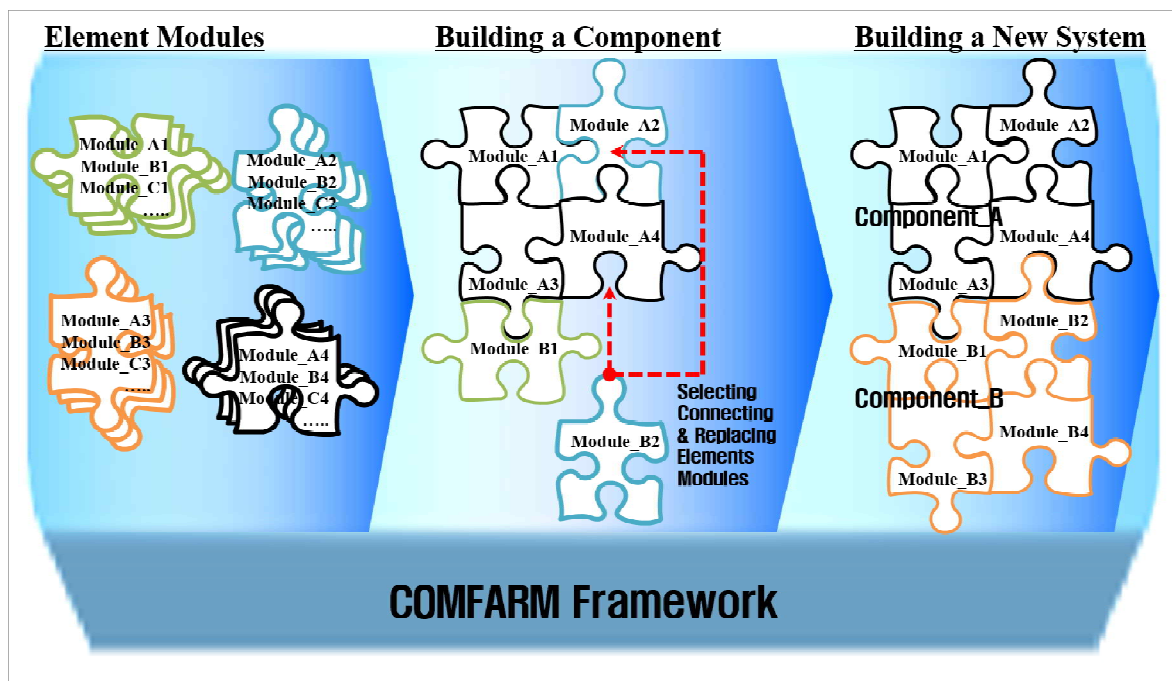
서울대학교에서는 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복잡화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여, 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크인 COMFARM (COmponent-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management)을 개발하였다.

COMFARM은 이클립스 (Eclipse) 통합 개발 환경 (Integrated Development Environment, IDE)에서 자바언어를 통해 개발되고 있으며, 이로 인해 자바 런타임 환경 (Java runtime environment, JRE)이 구축되어 있으면 운영체제에 관계없이 동일하게 작동할 수 있다. 또한, COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한 모형을 인터페이스를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었다. 이러한 COMFARM의 구조는 응용프로그램, 모형, 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 개발하고 통합할 수 있으므로 모형의 재사용성을 높일 수 있고 응용프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있다.

COMFARM은 농촌용수 물순환 해석과 관련된 요소 기술 컴포넌트를 조합하여 사용자에게 따른 맞춤형 모형을 구성하는 Framework를 제공한다. 이러한 개념은 (그림 첨부 II-1)과 같이 레고플레이트와 레고 블록을 단순하게 조립하여 다양한 작품을 제작하는 것과 비슷하며, 사용자는 COMFARM을 통해 다양하게 제작된 입·출력 모듈, 모의 모듈들을 손쉽게 연결하여 사용자 맞춤형 모형을 설계할 수 있다. 또한, COMFARM에 기 내재되어 있는 모듈이외에도 사용자가 자체적으로 모듈을 개발하여 수정하거나 추가할 수 있다.

COMFARM은 유역단위 농촌용수의 체계적·과학적 해석 및 관리가 가능하며 판단하며, 이를 바탕으로 농촌유역 단위의 미래 농촌용수 예측은 물론 중장기 농촌용수 활용계획을 위한 정책 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 매뉴얼에서는 COMFARM 개요, 설치, 모듈 및 입·출력자료, 조작방법, 모듈 실행방법, 그리고 범용 모듈 사용방법 등을 소개하고자 한다.



(그림 첨부 II-1) COMFARM의 기본개념

1.2 COMFARM Architecture

COMFARM은 일련의 동적 모듈을 조합하고 통합할 수 있는 구조로서, 모델링 시스템 개발을 위한 유연성, 확장성, 재이용성, 모듈성 등을 극대화하였으며, 객체 지향 구조를 갖는 각각의 모듈에 대해 서로 연동하여 시스템을 구성할 수 있도록 설계되었다. 즉, COMFARM은 개발언어가 다르고, 서로 간의 입력변수가 상이한

모형을 COMFARM Interface를 통해 서로 연동하고 모의할 수 있도록 설계되었다. 이러한 COMFARM의 구조는 응용프로그램, 모형, 컴포넌트가 완전히 분리된 상태에서 개발하고 통합할 수 있으므로 모형의 재사용성을 높일 수 있고 응용프로그램의 확장성을 크게 향상시킬 수 있다.

COMFARM의 주요 구성 모듈 (architectural module)은 (그림 첨부 II-1) 에서와 같이, COMFARM 프레임워크 모듈 (COMFARM Framework Module or COMFARM System), 환경 관리자 (Configuration Manager), 모형 관리자 (Model Manager), 자료 관리자 (Data Manager), 모형 래핑 관리자 (Model-wrapping Manager), 그리고 그래픽 사용자 인터페이스 (Graphical User Interface, GUI) 등 총 6개로 구성되어 있으며, 각각의 기능과 역할은 다음과 같다.

COMFARM 프레임워크 모듈 (COMFARM 시스템)은 전반적인 도메인 모델링을 실행하기 위한 주요 구성 모듈 간의 인터페이스와 시스템 환경을 정의한다.

환경 관리자는 기존 모듈을 불러와 새로운 형태의 시스템을 구성하거나 몇 개의 모듈을 이용해 다양한 컴포넌트 그룹을 구성하고, 구성된 컴포넌트 그룹을 조합하여 새로운 컴포넌트 그룹을 구성하는 다층 구조의 시스템 구성 등을 정의하고, 새로운 모델링 시스템을 구현한다. 환경 관리자모듈은 일반사용자가 GUI를 통해 모듈을 등록하고 모듈 간의 연관관계를 구성할 수 있도록 하는 기능을 제공한다.

모형 관리자는 모의모형의 서브모듈과 최적화 서브모듈로 구성되며 농촌용수물순환 요소의 모의기법들을 정의·관리하고, 모형의 보정 과정에서는 매개변수 최적화를 수행한다. 또한, 모형 관리자는 SWAT 모형, TANK 모형, Penman-Monteith 식, 그리고 물수지 식 등과 같이 잘 알려진 모형 등에 사용되는 주요 함수를 이용하여, 유역 유출량, 저수지 물수지, 관개배수량 등을 모의할 수 있는 새로운 모형 또는 모델링 시스템의 구현을 정의하고 관리한다. 모형 관리자는 일관된 방식으로 모듈러 모델들을 구성하고 연동이 가능하도록 하며, 외부제어 도구와 상관없이 모든 모듈러 모델의 데이터를 교환하고 계산할 수 있는 기능을 제공한다.

자료관리자는 SQL (Structured Query Language, Microsoft SQL Server, 2012)로 작성된 관계형 데이터베이스시스템 (Rational Database-Management System, RDBMS) 기반의 JAVA (Oracle Java Standard Edition, Ver. 7) 언어로 개발되었다. 자료관리자 모듈은 중앙 데이터베이스로 ASCII 파일로 변환하여 연동시키며, 데이터의 표준화를 위한 유틸리티 라이브러리를 제공한다. 자료 관리자는 기상자료, 유역특성, 영농자료 등의 데이터베이스에서 데이터를 불러오고 관리하는 기능을 수행하며, 자료 표준화를 위한 유틸리티 라이브러리를 제공한다. 자료 관리자는 사용자와 데이터베이스 또는 데이터베이스간의 체계적이고 일관된 인터페이스를 제공하며, 데

데이터베이스의 정의, 구축, 검색, 갱신, 그리고 관리 등을 수행한다. 각각의 모듈에서 계산되거나 구축되어지는 모든 자료는 자료관리자에 의해 저장되고 관리된다. 결과적으로 데이터베이스와 모듈러 모델간의 표준화된 인터페이스는 자료관리 모듈을 통해서 수행되어진다.

모형 래핑 관리자는 기존 모듈, 컴포넌트 간 표준화된 입출력 라이브러리를 이용하여 입·출력 자료의 변환을 수행함으로써 데이터 연동 (전달)이 수월하도록 연결해주는 기능을 제공한다. 모듈러 모델의 국가 또는 지역적 특성을 반영하여 모형/모델의 확장성을 담보하기 위해서, 모듈러 모델은 자료의 시공간성, 상이한 자료 표준, 소스코드에 내재되어 있는 차이점 등과 함께 다양한 형태의 입출력 자료 연동이 가능해야만 한다 (HarmonIT project, 2002). 따라서, COMFARM 내의 모형 래핑 관리자는 농촌용수 해석과 지역적 특성에 대한 복잡성을 최대한 완화시킬 수 있도록 기존 요소 모듈, 모듈러 모형, 다양한 컴포넌트, 그리고 다른 형태의 모듈과 자료들 간의 연동을 지원한다.

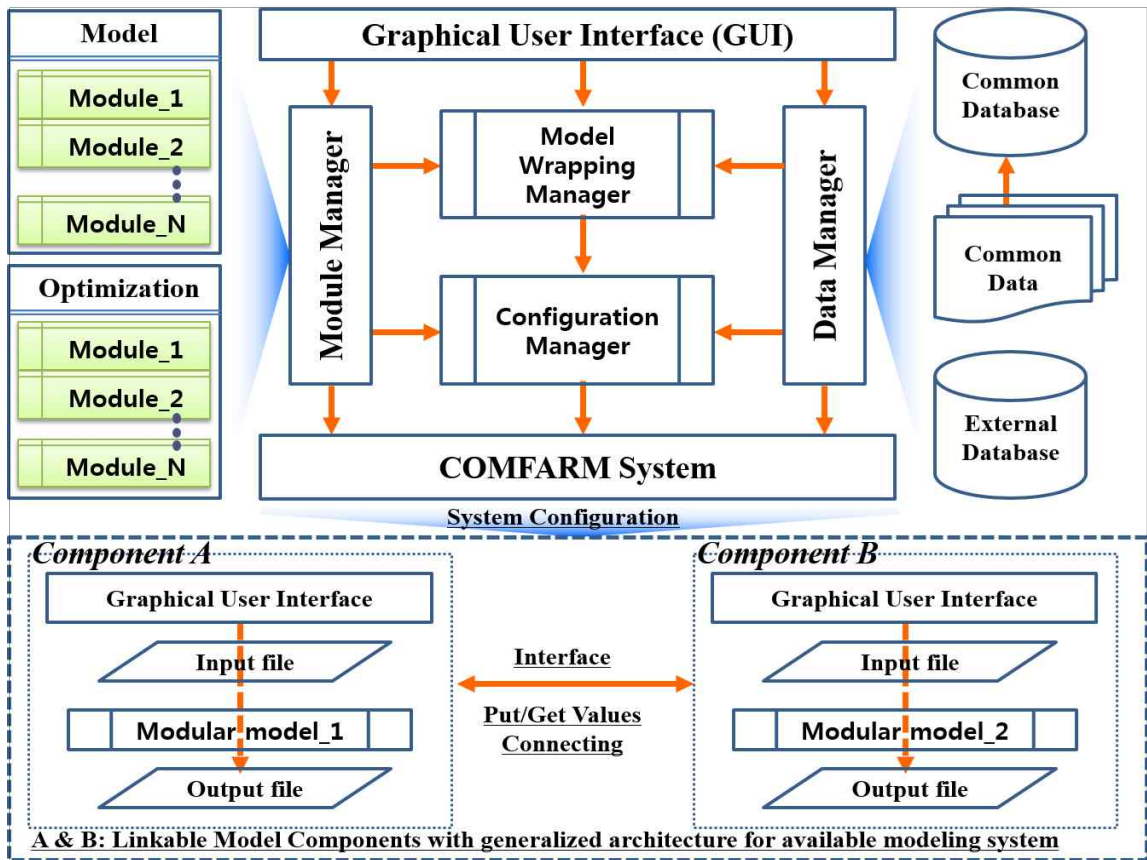
GUI 시스템 모듈은 컴퓨터에 대한 지식이 부족한 일반사용자가 쉽게 기존 모듈을 등록하고 연관관계를 구성하고 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 지원하는 기능을 제공하는 사용자 편의 시스템을 제공한다. 이 모듈은 워크스페이스 윈도우 상에서 아이콘을 끌어놓기 (drag and drop)하여 사용자로 하여금 다양한 모듈과 컴포넌트를 쉽게 연동할 수 있도록 하고, 사용자가 구성하고자 하는 모델링 시스템을 구현하도록 지원한다. 사용자는 연동 처리과정을 시각화할 수 있고, 아이콘을 이용하여 직관적으로 다양한 특성을 부여할 수 있다. 또한, 사용자는 GUI를 통해 정보나 자료를 입력할 수 있고, 모듈러 모델의 입력자료로 변환할 수 있다. GUI 시스템 모듈은 입출력 자료와 모듈연계기능을 표나 그래프로 도시할 수 있도록 지원하며, 사용자의 편의를 제공하기 위하여 모형의 적용을 위한 입력값의 기본값을 대화창에서 기본적으로 제시해 준다.

모델링 시스템의 구조는 일반적으로 컴포넌트와 컴포넌트간의 연결도구 (connector)로 구성된다 (HarmonIT, 2002). (그림 첨부 II-2)에서와 같이, COMFARM 상에서의 연결 가능한 모델 컴포넌트는 사용자 인터페이스와 모듈러 모델로 구성된다. 모듈러 모델은 특정 대상 연구분야에 있어서 상호연계된 일련의 요소 모듈들의 조합으로서, 메타데이터를 포함하는 해당 분야 모듈들을 순서대로 실행할 수 있도록 구성되어 있다.

또한, 사용자 인터페이스를 통해 제공되는 정보는 모듈러 모형의 입력자료로 변환되어 제공된다. 사용자는 다양한 옵션을 선택하여 필요로 하는 모듈을 실행할 수 있다. 컴포넌트는 구축된 입력자료를 연결하고, 모듈러 모형을 실행하여 필요로 하는 계산과 모의를 수행하며, 그 결과를 출력하여 표나 그래프로 도시할 수 있도록 하는 기능을 제공한다. 모델링 시스템은 연계 가능한 컴포넌트 모듈을 조

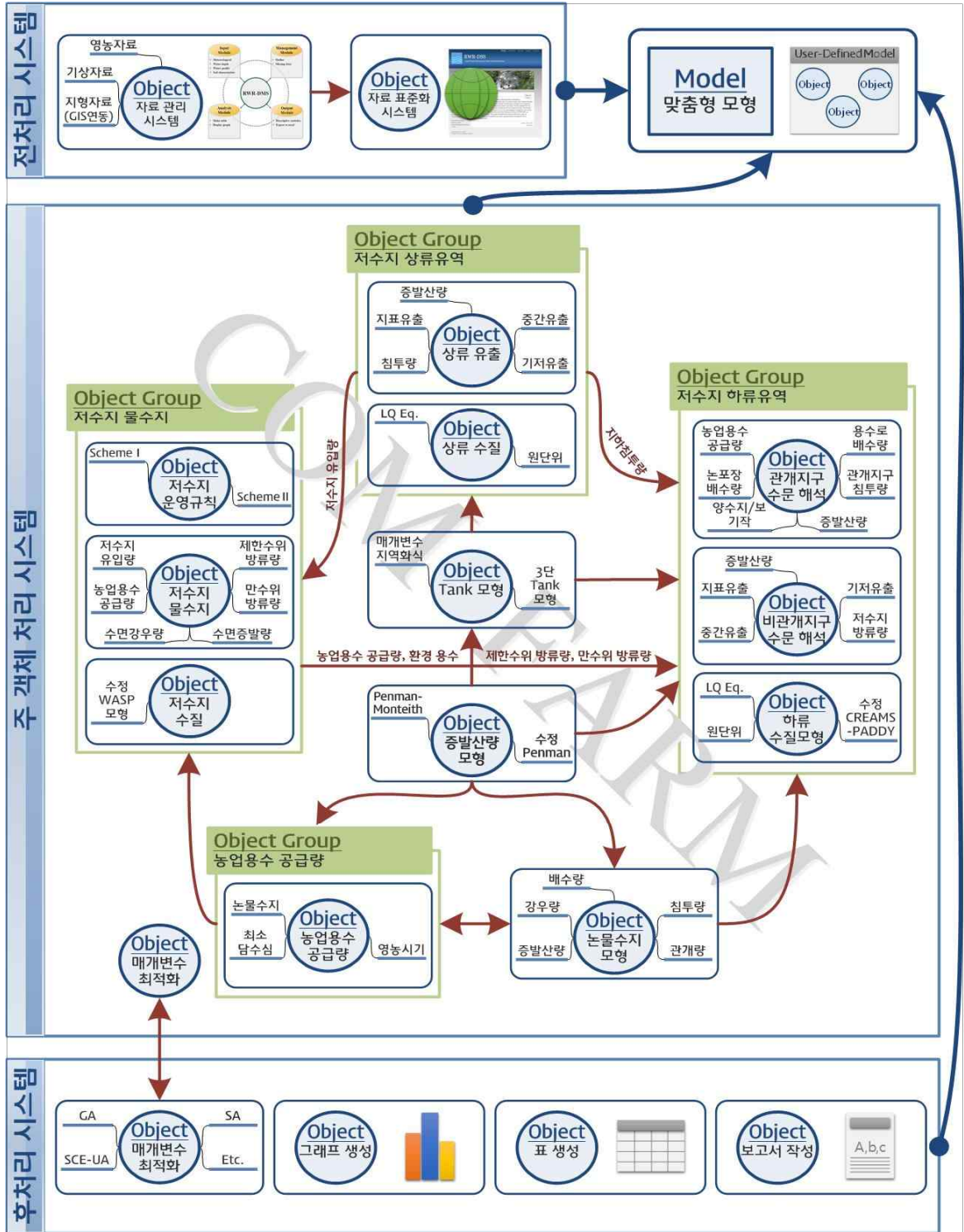
합하여 이용함으로써, 사용자 중심의 맞춤형 시스템을 제공한다.

따라서, COMFARM은 상기의 6개의 주요 시스템 모듈을 바탕으로, 개발자 또는 일반사용자가 필요로 하는 특정 영역 분야에 대하여, 다양한 요소 모듈을 조합하여 구성된 연계 가능한 컴포넌트를 연동함으로써 사용자 맞춤형 모델링 시스템을 구축할 수 있는 도구를 제공한다.



(그림 첨부 II-2) COMFARM 아키텍처

(그림 첨부 II-3)은 COMFARM Framework을 이용하여 구축된 농촌용수 물순환 해석 시스템을 보여주고 있다. 농촌용수 물순환 해석 시스템은 전처리 시스템, 주 객체 처리 시스템, 후처리 시스템으로 크게 구분된다. 전처리 시스템에서는 농촌용수 물순환 해석을 위한 방대한 자료를 관리할 수 있는 자료 관리 및 표준화 시스템과 연동하여 맞춤형 모형에 필요한 입력 자료 (기상, 지형, 영농자료)를 제공하며, 주 객체 처리 시스템에서는 객체 지향 모델링 기법 기반의 플랫폼을 통해 사용자의 이용 목적에 맞는 맞춤형 모형을 구축할 수 있는 환경을 제공하고, 후처리 시스템에서는 사용자가 구축한 맞춤형 모형의 모의 결과를 그래프, 표, 보고서를 통해 출력할 수 있는 모듈을 제공한다.



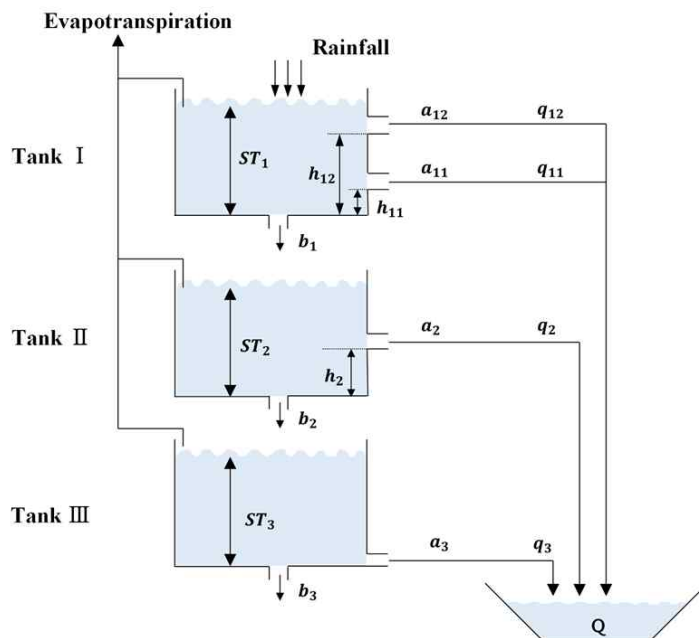
(그림 첨부 II-3) COMFARM 기반 농촌용수 물순환 해석 시스템

CHAPTER 2

COMFARM 컴포넌트 및 입력자료

2.1 유역유출량 컴포넌트

- 유역유출량 (또는 저수지 유입량) 분석은 Sugawara(1961)에 의해 제안된 Tank 모형을 이용함. 김현영과 박승우 (1988)는 국내의 중소유역에서의 유출 지체시간이 짧고 기저유출 부분의 기울기가 급하다는 점을 감안하여 수정 3단 TANK 모형을 제안하였으며, (그림 첨부 II-4)와 같음.



(그림 첨부 II-4) 3단 Tank 모형의 구성도

- 수정 3단 Tank 모형으로부터 유출량은 Equation 2.1로 정의됨.

$$Q_t = q_{11} + q_{12} + q_2 + q_3 \quad (2.1)$$

여기서, Q_t 는 t 일의 일유출량 (mm), q_{11} , q_{12} 은 상단 tank의 유출량 (mm), q_2 는 중간 tank의 유출량 (mm), q_3 은 하단 tank의 유출량 (mm)임. 이 때, 상단 tank의 유출량은 강우 즉시 발생하는 유출량으로 지표유출과 유사하며, 중간 tank 유출량은 중간유출량, 하부 tank는 기저 유출량을 나타냄.

- 지표유출량은 (그림 첨부 II-4)의 상단 tank에 있는 2개의 유출공에서의 유출량의 합으로 정의됨. q_{11} 은 상단 tank 상부유출공으로부터의 유출량, q_{12} 는 상단 tank 하부유출공으로부터의 유출량임. 각 유출공으로부터의 유출량은 Equation 2.2, 2.3의 저류량-유출량의 관계로부터 다음과 같이 정의됨.

$$q_{11} = a_{11}(ST_1 - h_{11}) \quad \text{when, } ST_1 > h_{11} \quad (2.2)$$

$$q_{12} = a_{12}(ST_1 - h_{12}) \quad \text{when, } ST_1 > h_{12} \quad (2.3)$$

여기서, ST_1 은 상단 tank 저류량 (mm), h_{11} , h_{12} 는 상단 tank 유출공의 높이 (mm), a_{11} , a_{12} 는 각 유출공의 저류계수임.

- 중간 유출 q_2 는 Equation 2.4와 같음.

$$q_2 = a_2(ST_2 - h_2) \quad \text{when, } ST_2 > h_2 \quad (2.4)$$

여기서, S_2 는 중간 tank의 저류량 (mm), h_2 는 유출공의 높이 (mm), a_2 는 저류계수임.

- 기저유출 q_3 은 Equation 2.5와 같음.

$$q_3 = a_3(ST_3 - h_3) \quad \text{when } ST_3 > h_3 \quad (2.5)$$

여기서, S_3 은 하단 tank의 저류량 (mm), h_3 은 유출공의 높이 (mm), a_3 은 저류계수임.

- 각 tank에서의 저류량 ST 는 Equation 2.6으로 나타낼 수 있음.

$$ST_{i,t} = ST_{i,t-1} + U_{i,t} - q_{i,t} - E_{i,t} - D_{i,t} \quad (2.6)$$

여기서, $ST_{i,t}$ 는 t 일의 i tank의 저류량 (mm), $ST_{i,t-1}$ 는 $t-1$ 일의 i tank의 저류량 (mm), $U_{i,t}$ 는 t 일의 강우량 (mm) 또는 $i-1$ 번 tank로부터의 유입량 (mm), $q_{i,t}$ 는 t 일의 유출량 (mm), $E_{i,t}$ 는 증발산량 (mm), $D_{i,t}$ 는 $i+1$ 번 또는 저류권역 아래로의

배수량 (mm)임. Equation 2.6에서 U 의 값은 상단 tank의 경우는 일강우량 (R), 중간과 하부 tank에서는 각각 D_1 , D_2 가 됨.

- 각 tank로부터 그 하단의 tank 또는 저류권역 아래로의 배수량은 Equation 2.7로 나타낼 수 있음.

$$D_i = b_i \times ST_i \quad (2.7)$$

여기서, D_i 는 i tank의 배수량 (mm), ST_i 는 저류량 (mm), b_i 는 배수계수임.

- 미계측 유역 적용을 위한 수정 3단 Tank 모형의 매개변수 추정 회귀식은 김현영(1988)과 안지현(2013)의 식을 이용할 수 있음.

<표 첨부 II-1> 김현영 (1988) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식

Parameters	Regression equation
a_{11}	$-0.00414 \times Paddy + 0.169$
a_{12}	$-0.00175 \times Forest + 0.333$
a_2	$0.00657 \times Upland + 0.163$
a_3	$-0.000267 \times Upland + 0.00912$
b_1	$-0.070 \times \ln(Area) + 0.470$
b_2	$0.00998 \times Paddy + 0.111$
b_3	$-0.00618 \times \ln(Area) + 0.0351$
h_{11}	$16.68 \times \ln(Area) + 24.20$
h_{12}	5.0
$\ln(h_2)$	$-0.0934 \times Upland + 2.0904$
h_3	0.0
ST_3	$43.686 \times \ln(Area) + 37.159$

<표 첨부 II-2> 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case I)

Parameters	Regression equation
a_{11}	$-0.0003 \times Slope - 0.017 \times \ln(Area) - 0.067 \times \ln(Upland) + 0.398$
a_{12}	$-0.004 \times Paddy + 0.001 \times Forest + 0.163 \times \ln(Slope) - 0.27$
a_2	$9.897 \times 10^{-5} \times Paddy + 0.028 \times \ln(Forest) + 0.0003 \times \ln(Slope) - 0.03$
a_3	$-0.0002 \times Upland + 4.092 \times 10^{-5} \times \ln(Area) + 0.001 \times \ln(Length) + 0.006$
b_1	$0.003 \times Slope - 0.101 \times \ln(Upland) + 0.262$
b_2	$-0.01 \times \ln(Area) + 0.1$
b_3	$7.086 \times 10^{-6} \times Paddy + 7.754 \times 10^{-5} \times Forest + 0.001$
h_{11}	$0.318 \times Forest - 0.543 \times Slope + 22.018$
h_{12}	$-0.004 \times Area + 0.333 \times Slope + 44.939$
h_2	$0.421 \times Forest + 15.412 \times \ln(Upland) - 22.099$
ST_3	$1.147 \times Forest - 49.086$ 43.013

<표 첨부 II-3> 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 매개변수 지역화식 (Case II)

유역경사	Parameters	Regression equation
$S \leq 25.0\%$	a_{11}	$0.006 \times Slope - 0.026 \times \ln(Upland) - 0.006 \times \ln(Area) + 0.147$
	a_{12}	$0.032 \times Paddy + 0.024 \times Forest + 0.669 \times \ln(Slope) - 3.889$
	a_2	$0.003 \times Paddy + 0.173 \times \ln(Forest) + 0.034 \times \ln(Slope) - 0.792$
	a_3	$-0.000209 \times Upland + 0.005 \times \ln(Area) - 0.007 \times \ln(Length) + 0.008$
	b_1	$0.005 \times Slope + 0.064 \times \ln(Upland) - 0.079$
	b_2	$-0.004 \times \ln(Area) + 0.049$
	b_3	$-0.000106 \times Paddy - 0.00006 \times Forest + 0.013$
	h_{11}	$-0.173 \times Forest + 0.648 \times Slope + 30.316$
	h_{12}	$-0.001 \times Area + 1.169 \times Slope + 32.089$
	h_2	$0.606 \times Forest + 27.512 \times \ln(Upland) - 60.507$
	ST_3	$-0.718 \times Forest + 100.552$
$25.0\% < S < 31.4\%$	Parameters	Regression equation
	a_{11}	$-0.009 \times Slope - 0.025 \times \ln(Upland) - 0.016 \times \ln(Area) + 0.554$
	a_{12}	$-0.01 \times Paddy + 0.013 \times Forest - 0.426 \times \ln(Slope) + 0.819$
	a_2	$-0.00003 \times Paddy + 0.000335 \times \ln(Forest) + 0.025 \times \ln(Slope) + 0.008$
	a_3	$-0.000077 \times Upland + 0.00024 \times \ln(Area) + 0.00046 \times \ln(Length) + 0.004$
	b_1	$-0.003 \times Slope - 0.133 \times \ln(Upland) + 0.475$
	b_2	$-0.008 \times \ln(Area) + 0.095$
	b_3	$-0.000025 \times Paddy + 0.000247 \times Forest - 0.012$
	h_{11}	$1.317 \times Forest - 2.091 \times Slope - 12.784$
	h_{12}	$-0.004 \times Area + 0.587 \times Slope + 44.273$
	h_2	$0.592 \times Forest + 1.201 \times \ln(Upland) - 8.915$
ST_3	$1.118 \times Forest - 43.578$	
$S \geq 31.4\%$	Parameters	Regression equation
	a_{11}	$-0.034 \times Slope + 0.065 \times \ln(Upland) - 0.035 \times \ln(Area) + 1.694$
	a_{12}	$0.011 \times Paddy + 0.003 \times Forest + 1.109 \times \ln(Slope) - 3.963$
	a_2	$0.001 \times Paddy + 0.081 \times \ln(Forest) + 0.027 \times \ln(Slope) - 0.369$
	a_3	$-0.000294 \times Upland - 0.002 \times \ln(Area) + 0.004 \times \ln(Length) + 0.005$
	b_1	$-0.006 \times Slope - 0.086 \times \ln(Upland) + 0.506$
	b_2	$-0.013 \times \ln(Area) + 0.112$
	b_3	$0.000323 \times Paddy + 0.000103 \times Forest - 0.004$
	h_{11}	$0.924 \times Forest - 0.374 \times Slope - 31.299$
	h_{12}	$0.001 \times Area + 0.115 \times Slope + 53.262$
	h_2	$-1.533 \times Forest + 2.135 \times \ln(Upland) + 153.058$
ST_3	$0.076 \times Forest + 49.761$	

가. 입력자료

- 유역유출량 컴포넌트의 입력은 [기상 자료], [유역 특성], [Tank 모형 매개변수 1], [Tank 모형 매개변수 2], [Tank 모형 매개변수 3], [유역유출량 분석] 등으로 구성되고 입력자료는 <표 첨부 II-4>와 같음
- [기상 자료] 모듈에서는 강우량, 평균기온, 상대습도, 일조시간, 풍속, 그리고 증발량 등 기상자료를 데이터베이스로부터 불러오거나 사용자가 상기 자료를 구축함

- [유역 특성] 모듈에서는 유역 면적, 발 비율, 논 비율, 산림 비율 등을 입력하며, 상기 자료는 Tank 모형 매개변수 추정에 이용됨
- [Tank 모형 매개변수 1] 모듈은 김현영 (1988) 개발 Tank 모형 지역화식을 이용하여 매개변수를 추정함
- [Tank 모형 매개변수 2] 모듈은 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 지역화식 (Case I)을 이용하여 매개변수를 추정함
- [Tank 모형 매개변수 3] 모듈은 안지현 (2013) 개발 Tank 모형 지역화식 (Case II)을 이용하여 매개변수를 추정함
- [유역유출량 분석] 모듈은 [기상자료] 모듈과 [Tank 모형 매개변수] 모듈과 연동되어 수정 3단 Tank 모형을 구동함

<표 첨부 II-4> 저수지 상류유역 모듈의 입력자료

입력자료	모의요소	자료형식	단위	비고
강우량	유역 증발 산량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온		실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도		실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간		실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속		실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도		실수 (소수점 2자리)	°	
위도		실수 (소수점 2자리)	°	
표고		실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이		실수 (소수점 2자리)	m	
상류 유역면적		매개 변수	실수 (소수점 1자리)	km ²
논 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
밭 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
산림 비율	실수 (소수점 1자리)		%	
유역경사	실수 (소수점 1자리)		%	
유로장	실수 (소수점 2자리)		km	

나. 출력자료

- 유역유출량 컴포넌트의 출력은 [일별 유출량], [유출량 그래프], [유황곡선] 등으로 구성되고 출력자료는 <표 첨부 II-5>와 같음
- [일별 유출량] 모듈에서는 일별 유역유출량 (또는 저수지 유입량)과 지하 침투량 모의 결과를 표로 보여주고나 파일로 저장함
- [유출량 그래프] 모듈에서는 유역유출량 모의 결과를 그래프로 보여줌
- [유황곡선] 모듈에서는 일별 유역 유출량 모의 결과를 바탕으로 유황곡선을 작성하여 보여줌

<표 첨부 II-5> 저수지 상류유역 모듈의 출력자료

출력자료	자료형식	단위	비고
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
지하 침투량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력

2.2 농업용수 공급량 분석

- 농업용수 공급량은 필요수량과 관개효율 (irrigation efficiency)을 고려하여 Equation 2.8과 같이 계산함.

$$AWS_i = \frac{A_{rice}}{Es} \frac{IR_i}{1000} \text{ for } AWS_i \leq AWS_{max} \quad (2.8a)$$

$$AWS_i = AWS_{max} \text{ for } AWS_i > AWS_{max} \quad (2.8b)$$

여기서, AWS 는 농업용수 공급량 (m^3), A_{rice} 는 관개면적 (m^2), IR 은 필요수량 (mm), Es 는 관개효율 (%), AWS_{max} 는 일 최대 공급량 (m^3), 그리고 i 는 시간 간격 (day)임.

- 관개효율은 (1-시설관리 손실률)을 의미하며, 송수효율과 배분효율의 곱으로부터 산정할 수 있고, 반복이용수량은 고려하지 않았음. 송수효율은 송수 손실 수량과, 그리고 배분효율은 배분관리 용수량과 관계됨. 배분관리 용수량이란 용수의 원활한 배분관리를 위하여 여분으로 공급하는 수량으로, 포장으로 유입되지 않고 하천으로 직접 회귀되는 수량으로 용수로 배수량이라고도 함 (정하우 등, 2006; 송정현 등, 2013a). 관개효율은 기상, 지형, 수리시설물 운영자의 조작방식, 그리고 농민의 물관리 방식 등에 따라 달라지며 우리나라의 경우 약 46~93%의 범위를 보이는 것으로 보고되고 있음 (Bos and Nugteren, 1990; Kim et al., 2005). 일 최대 공급량은 수리시설물의 제원 및 운영자의 조작방식에 따라 결정됨.
- 필요수량은 농업기반공사 (2005)와 주옥종 등 (2006)이 제시한 변경된 필요수량 산정방식에 따라 논벼의 생육기를 논물가두기, 묘대기, 이앙기, 본답기, 그리고 중간낙수기 등과 같이 구분하여 산정하였음. 논물가두기, 묘대기, 그리고 이앙기의 필요수량 모의 방식은 강민구 등 (2014)에 상세히 서

술되어 있음. 본 연구에서는 묘대 용수량(NWR) 및 이양 용수량(TWR) 매개 변수를 입력받도록 구성하였고, 중간낙수기에는 용수공급이 중단되도록 구성하였음. 본답기의 필요수량은 Equation 2.9와 같이 논에서의 물수지식을 기반으로 추정함.

$$PD_i = PD_{i-1} + IR_i + ERAIN_i - (DR_i + ET_i + DP_i) \quad (2.9)$$

여기서, PD 는 담수심 (mm), IR 는 필요수량 (mm), $ERAIN$ 는 유효수량 (mm), DR 는 포장 배수량 (mm), ET 는 실제 증발산량 (mm), 그리고 DP 는 침투량 (mm)임.

- 포장 배수량은 Equation 2.10a ~ 2.10b와 같이 일별 담수심과 물꼬 높이의 차가 전량 당일에 배수되도록 구성하였음.

$$DR_i = PD_i - PD_{max} \text{ for } PD_i > PD_{max} \quad (2.10a)$$

$$DR_i = 0 \text{ for } PD_i \leq PD_{max} \quad (2.10b)$$

여기서, PD_{max} 는 물꼬 높이 (mm)임.

- 유효수량은 Equation 2.11a ~ 2.11c와 같이 강우량과 당일의 배수량을 고려하여 산정하였음.

$$ERAIN_i = 0 \text{ for } RAIN \leq 5 \quad (2.11a)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i \text{ for } DR_i = 0 \quad (2.11b)$$

$$ERAIN_i = RAIN_i - DR_i \text{ for } DR_i \geq 0 \quad (2.11c)$$

여기서, $RAIN$ 은 강우량 (mm)임. Equation 2.11a에서 강우량 5 mm 이하에서 유효수량이 0 mm인 이유는 벼 잎에 의한 차단을 고려했기 때문 (농림부, 1997).

- 담수기간의 필요수량 모의방법은 물수지식으로 계산된 당일의 담수심이 최소담수심 이하로 내려가는 경우 당일의 담수심과 최소담수심의 차를 필요수량으로 간주하여 최소담수심을 유지하는 방법을 이용함 (Equation 2.12a ~ 2.12b) (허유만 등, 1998).

$$IR_i = PD_{min} - PD_i \text{ for } PD_i < PD_{min} \quad (2.12a)$$

$$IR_i = 0 \text{ for } PD_i \geq PD_{min} \quad (2.12b)$$

여기서, PD_{min} 은 최소담수심 (mm)으로 농민이 논벼의 생육을 위해 최소로 유지하고자 하는 담수심임.

- 이상과 같이 농업용수 공급량 모의를 위해서는 묘대용수량, 이양용수량, 물꼬 높이, 최소담수심, 침투량, 그리고 관개효율 등의 매개변수가 입력 또는 모형의 보정 과정에서 이용되나, 이들 매개변수는 지역적 특성에 따라 그 범위가 다양하고 또한 정확한 정보를 얻기 어려운 특징을 가짐. 본 연구에서는 선행연구의 조사 결과를 바탕으로 공급량 모의 관련 대표 매개변수의 물리적 범위를 정리하였으며 <표 첨부 II-6>과 같다.

<표 첨부 II-6> 농업용수 공급량 모의 관련 매개변수

매개변수	정의	범위	참고문헌
PD_{max}	물꼬 높이 (mm)	34.6~123.7	Kang et al. (2006)
PD_{min}	최소 담수심 (mm)	3.0~60.0	허유만 등 (1993), Anan et al. (2004)
DP	침투량 (mm)	1.0~8.8	Im et al. (2000), Song et al. (2013)
Es	관개효율 (%)	46~93	Bos and Nugteren (1990), Kim et al. (2005)
NWR	묘대 용수량 (mm)	80~250	정하우 등 (2006)
TWR	이양 용수량 (mm)	80~250	정하우 등 (2006)

가. 입력자료

- 농업용수 공급량 컴포넌트의 입력은 [기상 자료], [작물계수], [농업용수 공급량 입력 자료], [농업용수 공급량 분석] 등으로 구성되고 입력자료는 <표 첨부 II-7>과 같음
- [기상 자료] 모듈에서는 강수량, 평균기온, 상대습도, 일조시간, 풍속, 그리고 증발량 등 기상자료를 데이터베이스로부터 불러오거나 사용자가 상기 자료를 구축함
- [작물계수] 모듈에서는 논벼의 순별 작물계수를 입력함
- [농업용수 공급량 입력 자료] 모듈에서는 논벼 재배 방법, 물꼬높이, 최소담수심, 침투량, 송수손실율, 배분관리용수율, 작부시기 등의 입력 자료를 입력함
- [농업용수 공급량 분석] 모듈은 [기상자료], [작물계수], 그리고 [농업용수 공급

량 입력 자료] 모듈과 연동되어 농업용수 공급량을 모의함

<표 첨부 II-7> 농업용수 공급량 모듈의 입력자료

입력자료	모의요소	자료형식	단위	비고
강우량	농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온		실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도		실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간		실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속		실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도		실수 (소수점 2자리)	°	
위도		실수 (소수점 2자리)	°	
표고		실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이		실수 (소수점 2자리)	m	
침투량		실수 (소수점 1자리)	mm	
최대 담수심		실수 (소수점 1자리)	mm	
최소 담수심		실수 (소수점 1자리)	mm	
작부시기 (이앙기)		정수	day	기간으로 입력
작부시기 (본답기)		정수	day	기간으로 입력
작부시기 (중간낙수기)		정수	day	기간으로 입력
작물계수		실수 (소수점 2자리)		순별 입력
송수 손실율		실수 (소수점 1자리)		연별 입력 또는 일괄 입력 (선택)
배분관리 용수율		실수 (소수점 1자리)		연별 입력 또는 일괄 입력 (선택)

나. 출력자료

- 농업용수 공급량 컴포넌트의 출력은 [농업용수 공급량 모의 결과], [농업용수 공급량 그래프] 등으로 구성되고 출력자료는 <표 첨부 II-8>과 같음
- [농업용수 공급량 모의 결과] 모듈에서는 농업용수 공급량 모의 결과를 표로 보여주고나 파일로 저장함
- [농업용수 공급량 그래프] 모듈에서는 농업용수 공급량 모의 결과를 그래프로 보여줌

<표 첨부 II-8> 농업용수 공급량 모듈의 출력자료

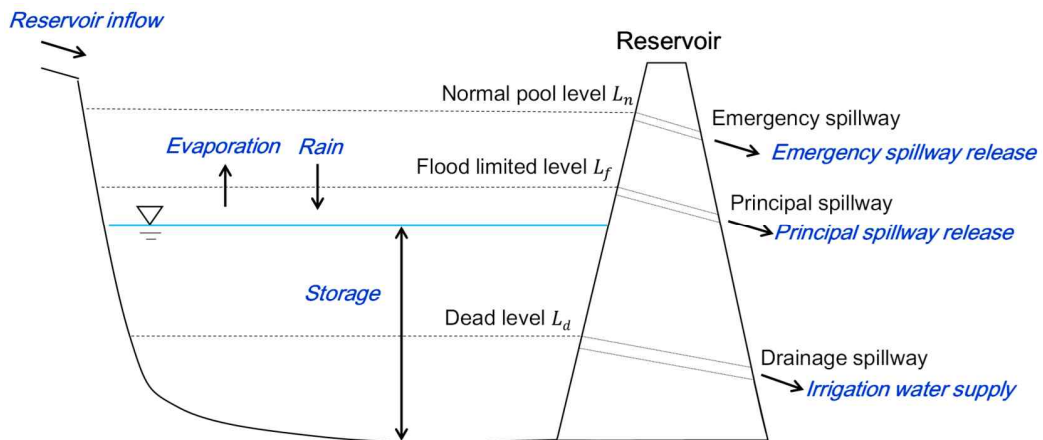
출력자료	자료형식	단위	비고
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
논 포장 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
용수로 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
송수 손실량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
관개지구 배수량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력

2.3 저수지 물수지 분석

- 저수지 물수지는 (그림 첨부 II-5)와 같으며, 다음 Equation 2.13과 같은 저수지 연속방정식으로 표현할 수 있음.

$$S_i = S_{i-1} + Q_i + RAIN_i - ROL_i - E_i - PS_i - ES_i \quad (2.13)$$

여기서, S 는 저수량 (m^3), Q 는 저수지 유입량 (m^3), $RAIN$ 는 저수지 수면 강우량 (m^3) ROL 은 농업용수 공급량 (m^3), E 는 저수지 수면 증발량 (m^3) PS 는 제한수위 방류량 (m^3), ES 는 만수위 방류량 (m^3) i 는 시간간격 (day)임. 농업용수 공급량, 제한수위 방류량, 만수위 방류량은 각각 사수위 (dead level), 제한수위 (flood-limited level), 만수위 (normal pool level)에 의해 영향을 받음.



(그림 첨부 II-5) 저수지 물수지 구성요소 및 관리수위

- 저수지의 수위 변화에 따른 저수량을 산정하기 위해서는 저수지의 표고별 내용적 자료가 필요함.
- 저수지 유입량 (I_t)는 유역유출량 모듈을 이용하여 모의하도록 구성하였음. 해당저수지의 상류유역이 미계측 지역인 경우 매개변수 추정 회귀식을 이용함. 매개변수 추정 회귀식은 김현영 (1988)과 안지현 (2013)의 회귀식 중 선택하여 이용하도록 구성하였음.
- 농업용수 공급량은 농업용수 공급량 모듈의 결과를 이용함.
- 우리나라 농업용 저수지는 일반적으로 물넘이가 자연 월류식으로 만수위 이상

의 저수량을 전량 월류하고 있음. 저수위가 만수위 이상인 경우 월류되는 수량을 만수위 방류량이라고 하며, 이는 Equation 2.14로부터 계산됨.

$$ES_i = S_i - S_n \quad (\text{단, } L_i > L_n) \quad (2.14)$$

여기서, ES 는 만수위 방류량 (m^3), S_i 는 당일의 저수량 (m^3), S_n 는 만수위의 저수량 (m^3), L_i 는 당일의 저수위 (m), L_n 는 만수위 (m)임.

- 한편, 농업생산기반시설 관리규정 (농림수산식품부훈령 제 240호)에 따르면 홍수기 피해를 줄이기 위하여 제한수위를 설정하여 관개에 지장을 주지 않는 범위에서 유지하도록 규정되어 있음. 따라서 자연 월류식 물넘이 이외의 물넘이가 설치된 지역에서는 제한수위를 운영하여 제한수위 이상의 저수량을 홍수기에 방류하고 있음. 제한수위 방류량은 Equation 2.15로부터 산정됨.

$$PS_i = S_i - S_f \quad (\text{단, } L_i > L_f \text{ and } PS_{\max} > PS_i) \quad (2.15a)$$

$$PS_i = PS_{\max} \quad (\text{단, } L_i > L_f \text{ and } PS_{\max} < PS_i) \quad (2.15b)$$

여기서, PS 는 제한수위 방류량 (m^3), PS_{\max} 는 일 최대 제한수위 방류량 (m^3), S_i 는 당일의 저수량 (m^3), S_f 는 제한수위의 저수량 (m^3), L_i 는 당일의 저수위 (m), L_f 는 제한수위 (m)임. 제한수위 방류량은 자연 월류식 물넘이가 아닌 수문 등을 통해서 방류되기 때문에 수문의 제원에 따른 일 최대 제한수위 방류량 이상을 방류할 수 없음. 또한, 제한수위 초과 수량은 제한수위 운영기에 방류하며 비운영기에는 방류하지 않음.

- 수면강우량 및 수면증발량은 Equation 2.16과 Equation 2.17과 같이 기상관측소의 강우량 및 증발량 실측치에 저수지 면적을 곱하여 산정함. 기상관측소의 증발량 실측치가 없는 경우 일사량, 풍속, 상대습도, 기온 등의 자료를 이용하여 Penman식을 이용하여 증발량을 산정하도록 구성하였음.

$$RAIN_i = rain \times A_i \quad (2.16)$$

$$E_i = evap \times A_i \quad (2.17)$$

여기서, $RAIN$ 은 저수지 수면 강우량 (m^3), E 는 저수지 수면 증발량 (m^3), A 는 당일의 저수면적, $rain$ 은 당일의 기상청 강우량 (mm), $evap$ 는 당일의 기상청 증발량 (mm)임.

- 저수지 운영규칙은 다음과 같음.

- ① 관개기에는 본 연구의 농업용수 공급량 산정방식에 따라 관개함.
- ② 중간낙수기에는 농업용수 공급을 강제 중단함.
- ③ 저수지 수위가 사수위 이하로 내려가면 농업용수 공급을 중단함.

- ④ 만수위 이상의 수위는 방류함.
- ⑤ 제한수위 관리기에 제한수위 이상의 저수량은 강제 방류함.

가. 입력자료

- 저수지 물수지 컴포넌트의 입력은 [기상자료], [유역 유출량], [농업용수 공급량 모의 결과], [저수지 내용적 곡선], 그리고 [초기 저수위] 등으로 구성되고 입력자료는 <표 첨부 II-9>와 같음
- [기상 자료] 모듈에서는 강우량, 평균기온, 상대습도, 일조시간, 풍속, 그리고 증발량 등 기상자료를 데이터베이스로부터 불러오거나 사용자가 상기 자료를 구축함
- [저수지 내용적 곡선] 모듈에서는 저수지 수위-내용적 곡선, 만수위, 사수위, 홍수기 제한수위, 그리고 제한수위 운영기 등을 입력함
- [초기 저수위] 모듈에서는 모의 시점의 저수지 수위를 입력함
- [저수지 물수지 분석] 모듈은 [기상자료], [유역 유출량], [농업용수 공급량 모의 결과], [저수지 내용적 곡선], 그리고 [초기 저수위] 모듈과 연동되어 저수지 물수지 요소를 분석함

<표 첨부 II-9> 저수지 물수지 모듈의 입력자료

입력자료	자료형식	단위	비고
강우량	실수 (소수점 1자리)	mm	기상자료 (일별 입력)
평균기온	실수 (소수점 1자리)	℃	기상자료 (일별 입력)
상대습도	실수 (소수점 1자리)	%	기상자료 (일별 입력)
일조시간	실수 (소수점 1자리)	hr	기상자료 (일별 입력)
평균풍속	실수 (소수점 1자리)	m/s	기상자료 (일별 입력)
경도	실수 (소수점 2자리)	°	
위도	실수 (소수점 2자리)	°	
표고	실수 (소수점 2자리)	m	
풍속계 높이	실수 (소수점 2자리)	m	
관개지구 면적	실수 (소수점 1자리)	km ²	배수량 모듈 입력값
상류 유역면적	실수 (소수점 1자리)	km ²	유입량 모듈 입력값
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	유입량 모듈 출력값 (일별)
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	공급량 모듈 출력값 (일별)
제한수위 관리기	정수	day	기간으로 입력
관개기	정수	day	기간으로 입력
환경용수 방류시기	정수	day	기간으로 입력
제한수위	실수 (소수점 1자리)	m	
사수위	실수 (소수점 1자리)	m	
만수위	실수 (소수점 1자리)	m	
표고수	정수		표고수의 입력값만큼 저수지 표고 - 면적 입력
저수지 내용적 (표고)	실수 (소수점 2자리)	m	
저수지 내용적 (면적)	실수 (소수점 2자리)	천 m ³	

나. 출력자료

- 저수지 물수지 컴포넌트의 출력은 [농업용수 공급량 모의 결과], [농업용수 공급량 그래프] 등으로 구성되고 출력자료는 <표 첨부 II-10>과 같음
- [저수지 물수지 분석 결과] 모듈에서는 저수지 물수지 요소의 모의 결과를 표로 보여주고나 파일로 저장함
- [저수량 그래프] 모듈에서는 저수지 물수지 분석에 따른 저수량의 그래프로 보여줌

<표 첨부 II-10> 저수지 물수지 모듈의 출력자료

출력자료	자료형식	단위	비고
저수지 유입량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
농업용수 공급량	실수 (소수점 1자리)	mm	일별 출력
만수위 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
제한수위 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
환경용수 방류량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
저수지 저수량	실수 (소수점 1자리)	천 m^3	일별 출력
저수지 수위	실수 (소수점 1자리)	m	일별 출력

CHAPTER 3

COMFARM 설치

3.1 JAVA JDK 설치 및 설정

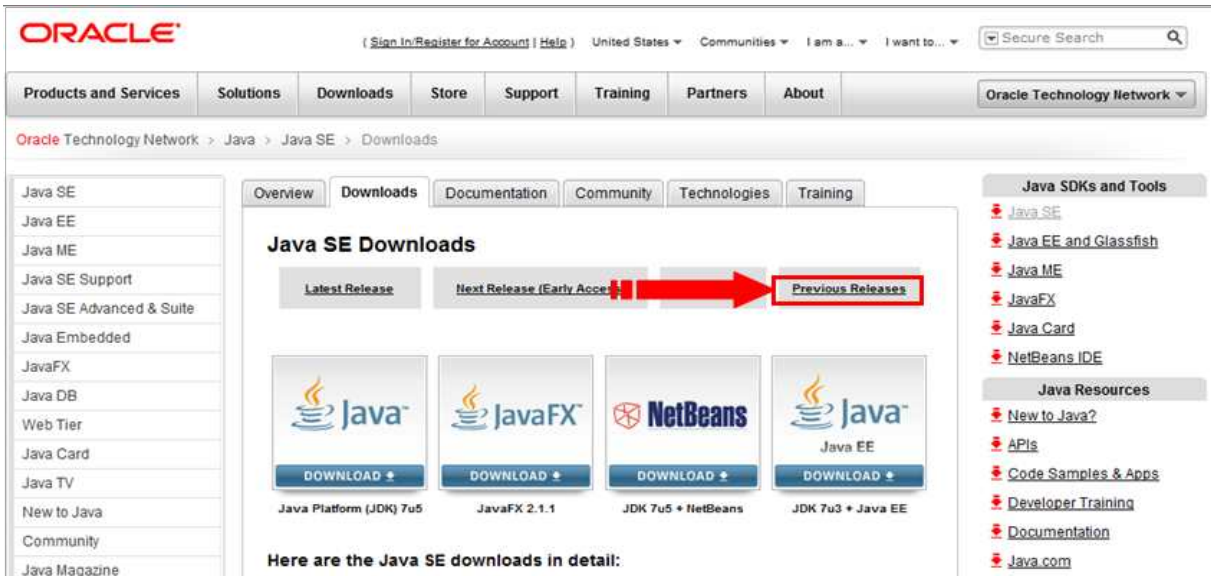
가. JDK 다운로드 및 설치

- <http://www.oracle.com/technetwork/java/index.html> 접속
- Software Download 부분에서 JDK 다운로드 Java SE 버튼 클릭



(그림 첨부 II-6) ORACLE Software Downloads

- Previous Releases 버튼 클릭하여 Java 버전 선택

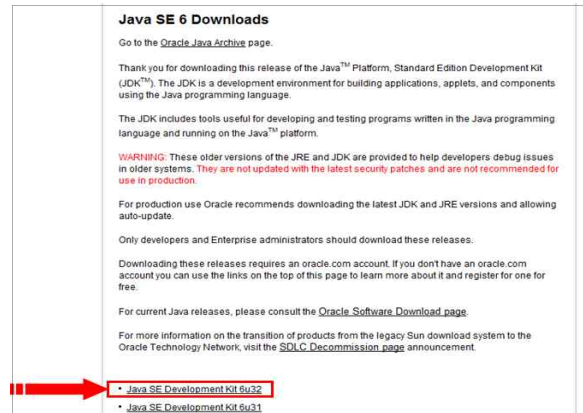


(그림 첨부 II-7) Java SE Download

- Java SE 6 선택 후 Java SE Development Kit 6u32 선택

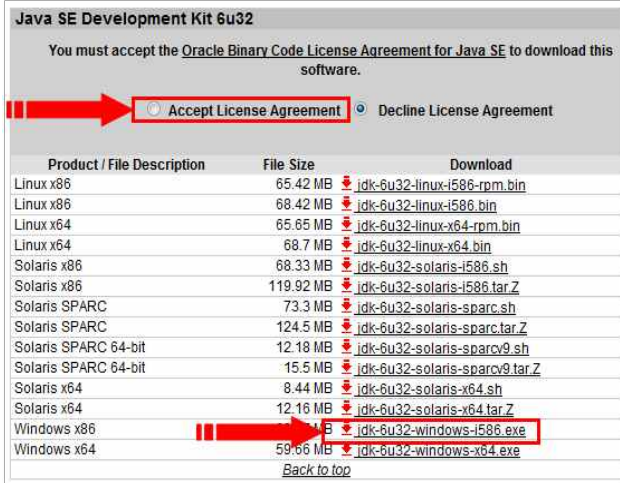


(그림 첨부 II-8) Java SE 6



(그림 첨부 II-9) Java SE Development Kit

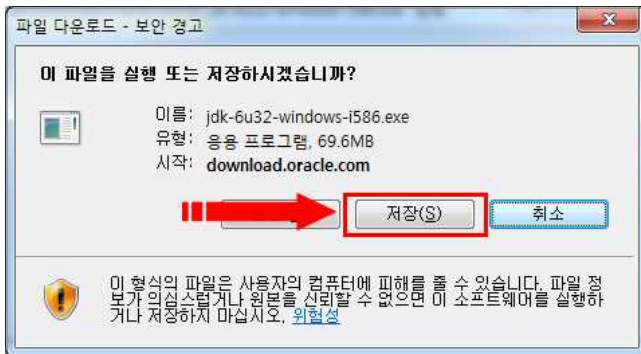
- Java 라이선스에 동의 후 해당 OS에 맞는 Java 버전 선택
- 다음 단계 진행을 위해 Oracle 회원가입 및 로그인
- 로그인에 성공하면 파일다운로드 창이 뜨고, 저장버튼을 눌러 다운로드할 파일의 위치를 지정
- 다운로드를 마치면 나타나는 다운로드 완료 창에서 실행 버튼 클릭



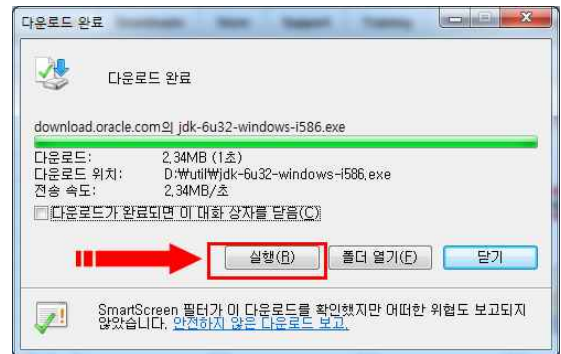
(그림 첨부 II-10) OS에 맞는 Java 버전 선택



(그림 첨부 II-11) Oracle 로그인



(그림 첨부 II-12) Java 설치파일 저장

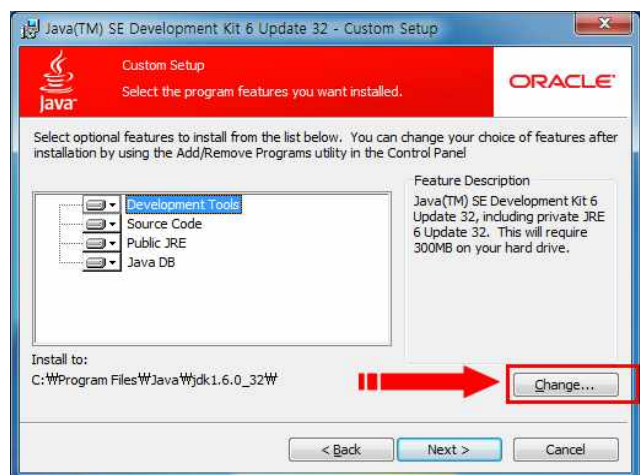


(그림 첨부 II-13) Java 설치파일 실행

- 'Change...'를 클릭하여 Java가 설치될 위치를 자신이 원하는 곳으로 지정
- 설치할 위치를 원하는 곳으로 입력하고 'OK' 버튼 클릭

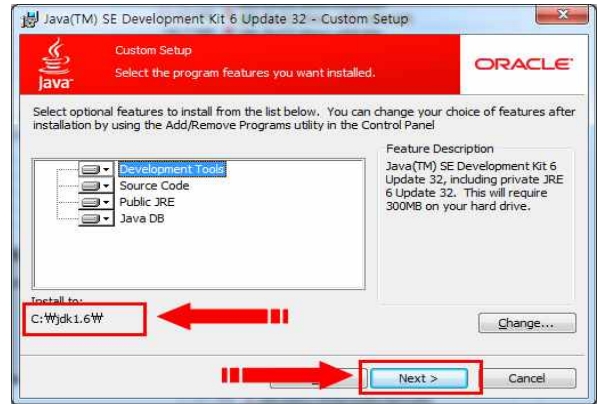
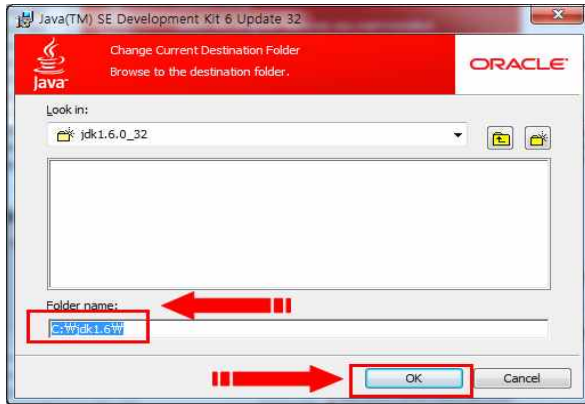


(그림 첨부 II-14) JDK 6 setup



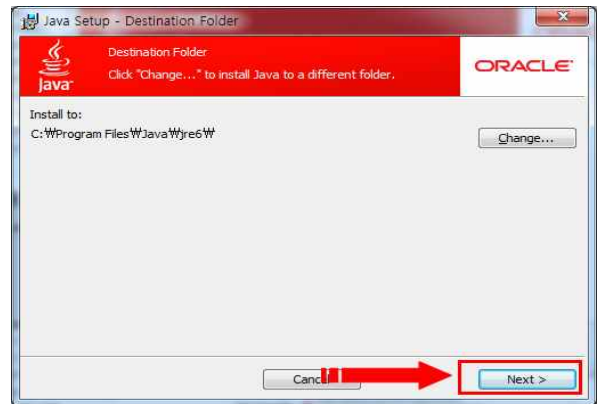
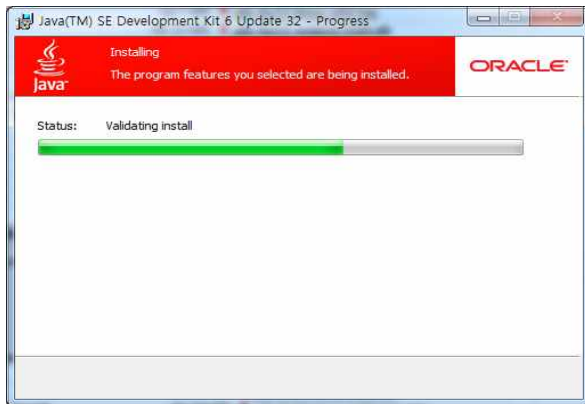
(그림 첨부 II-15) JDK custom setup

- 설치위치가 변경되었음을 확인 후, 'NEXT' 버튼 클릭하면 설치가 진행



(그림 첨부 II-16) JDK 6 change location (그림 첨부 II-17) JDK 6 changed location

- JDK설치 진행 도중, JRE 설치위치 변경 창에서 'NEXT' 버튼 클릭



(그림 첨부 II-18) JDK 6 install

(그림 첨부 II-19) JRE change location

- JRE 설치 진행 도중, 아래와 같은 화면이 나타나면 해당 '프로그램을 닫고 계속하기' 버튼 클릭하여 JRE 및 JDK 설치 완료

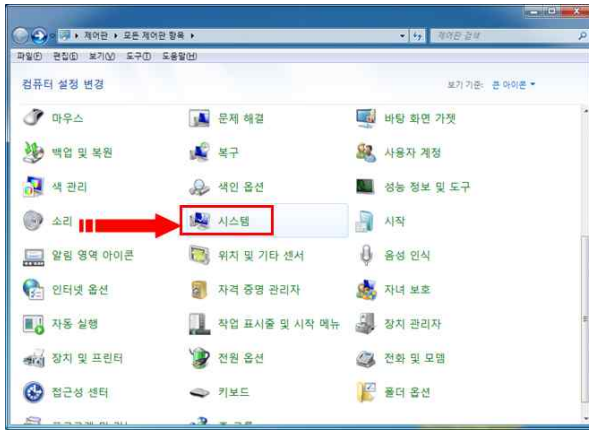


(그림 첨부 II-20) JDK 6 브라우저 닫기

(그림 첨부 II-21) JDK 6 install Complete

나. JDK 설정

- 제어판을 열고 '시스템' 클릭 후 '고급 시스템 설정' 클릭

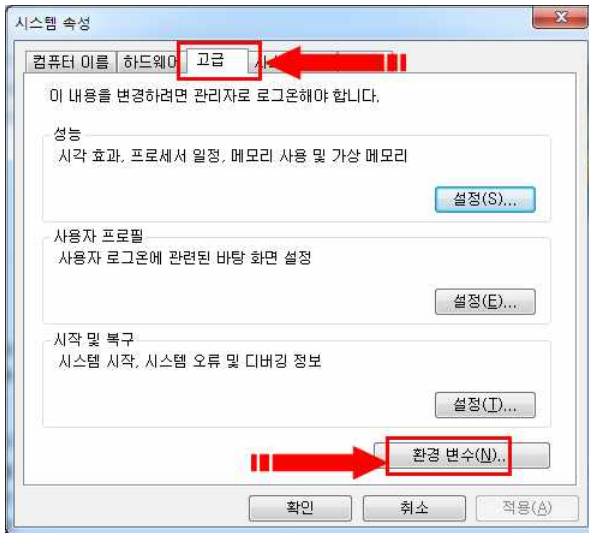


(그림 첨부 II-22) 제어판 -> 시스템

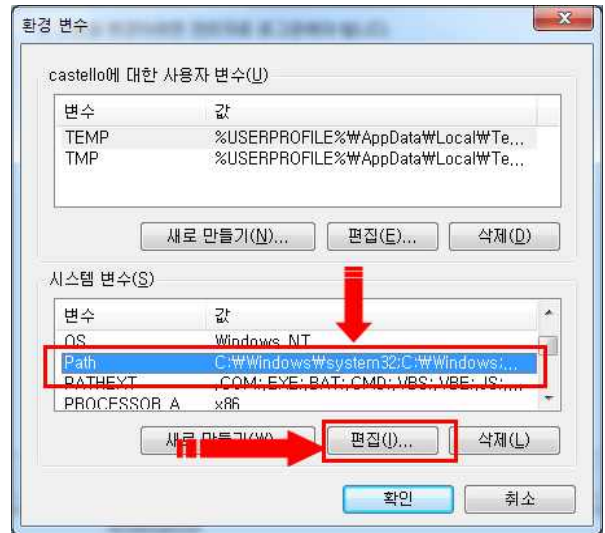


(그림 첨부 II-23) 고급 시스템 설정

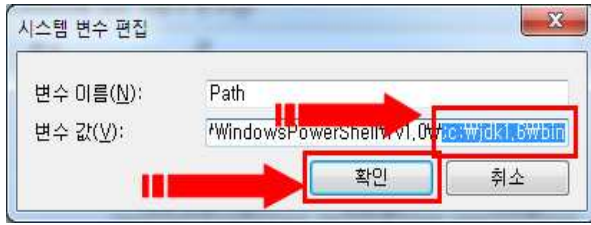
- 상단의 '고급' 탭을 클릭한 다음, 하단의 '환경변수(N)'를 클릭
- 환경변수 화면에서 'Path'를 선택하고 '편집(I)' 버튼을 클릭



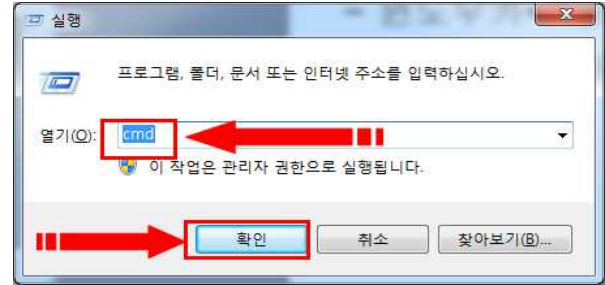
(그림 첨부 II-24) 고급 시스템 -> 고급 탭 (그림 첨부 II-25) 고급 시스템 -> 고급 탭



- 기존 'Path'의 '변수 값' 마지막에 ';c:\jdk1.6\bin'을 추가한 다음 '확인'버튼 클릭 (JDK설치장소\bin을 Path에 추가)
- 이렇게 해야 javac.exe와 같이 c:\jdk1.6\bin에 있는 실행파일들을 경로에 관계없이 어디서나 실행이 가능
- 환경변수 확인을 위해 실행창 (윈도우키 + R)에 'CMD' 입력 후 확인버튼 클릭

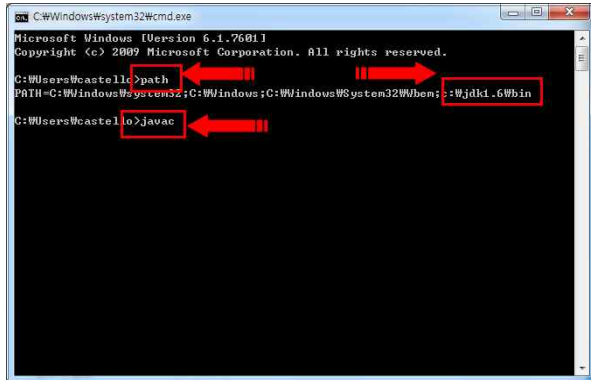


(그림 첨부 II-26) 시스템 변수 편집

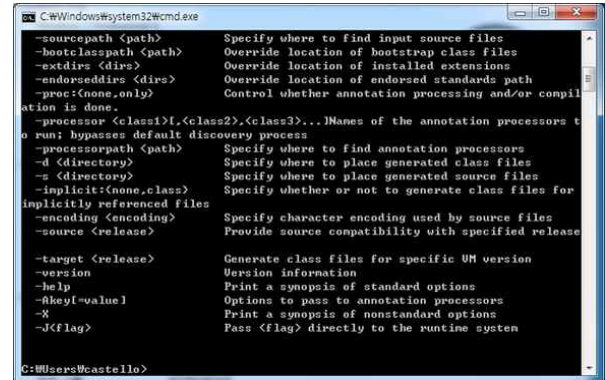


(그림 첨부 II-27) 윈도우 실행 창

- 도스창에 'path'라고 입력하면, 이전에 변경한 내용과 같이 설정된 path 확인 가능
- 'javac'라고 입력하여 (그림 첨부 II-29)와 같은 화면이 나타나면 정상적으로 설정



(그림 첨부 II-28) 환경변수 설정 PATH 확인



(그림 첨부 II-29) javac 설정 확인

- 만일 'javac은(는) 내부 또는 외부 명령, 실행할 수 있는 프로그램, 또는 배치 파일이 아닙니다'라는 내용이 나타나면 Path 설정이 잘못된 것으로서 다시 한 번 실제로 JDK를 설치한 위치와 Path를 확인

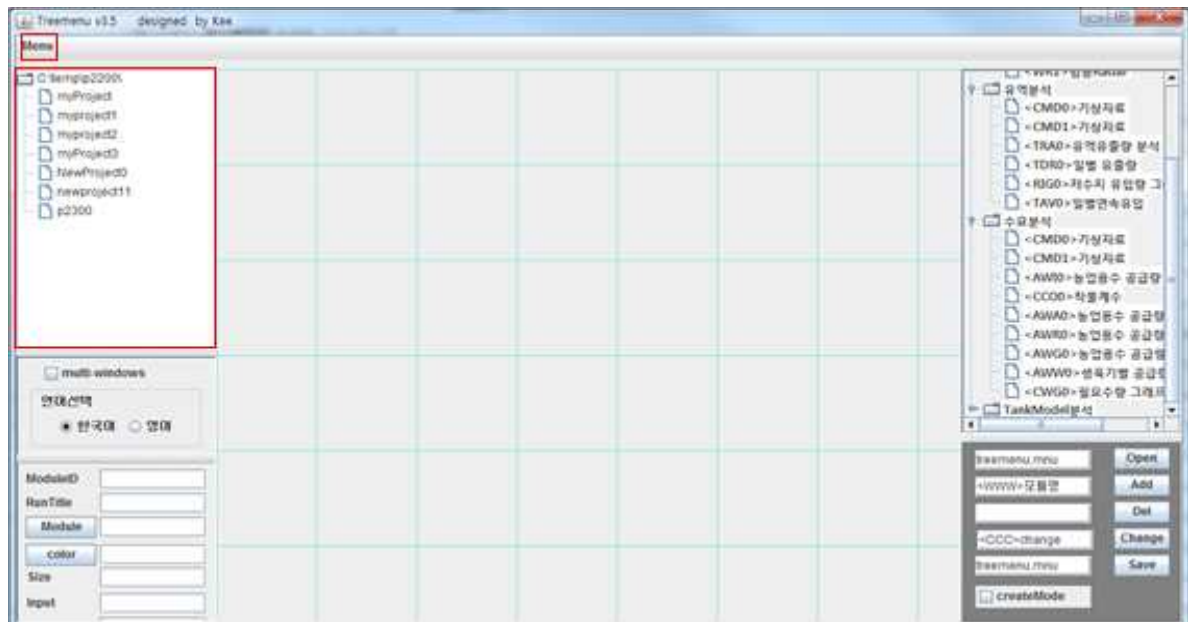
3.2 COMFARM 설치

가. Workspace 생성

- Workspace는 COMFARM에서 작업한 내용을 담기 위한 하나의 저장공간으로, *.prj 단위로 프로젝트를 관리하고 그와 연계된 파일을 자동으로 연결
- Workspace는 사용자가 원하는 폴더를 지정하여 생성함으로써 설치가 됨
- Workspace는 또한 추후 설치될 COMFARM 폴더 내 projConFig.ini 파일의 내용을 변경함으로써 workspace를 지정 가능

나. COMFARM 프로그램 설치

- COMFARM 프로그램 설치는 *.zip 파일의 압축을 해제하는 방식으로써
- 사용자가 원하는 폴더를 지정하여 압축파일을 해제하면 설치가 됨
- 설치폴더 내 COMFARM30.exe을 더블클릭하면 COMFARM 메인화면이 실행
- workspace 연결을 위해 화면상단의 “change workspace”를 클릭하여 기존 프로젝트 (*.prj) 중 하나를 선택하면 해당 workspace 내 프로젝트 목록이 메인화면의 트리목록에 표시
- 새로운 프로젝트 (*.prj) 생성을 위해 화면상단의 “new project”를 클릭하여 새 프로젝트 (*.prj) 이름을 지정해주면 해당 workspace내 새 프로젝트가 메인화면의 트리목록에 추가 표시

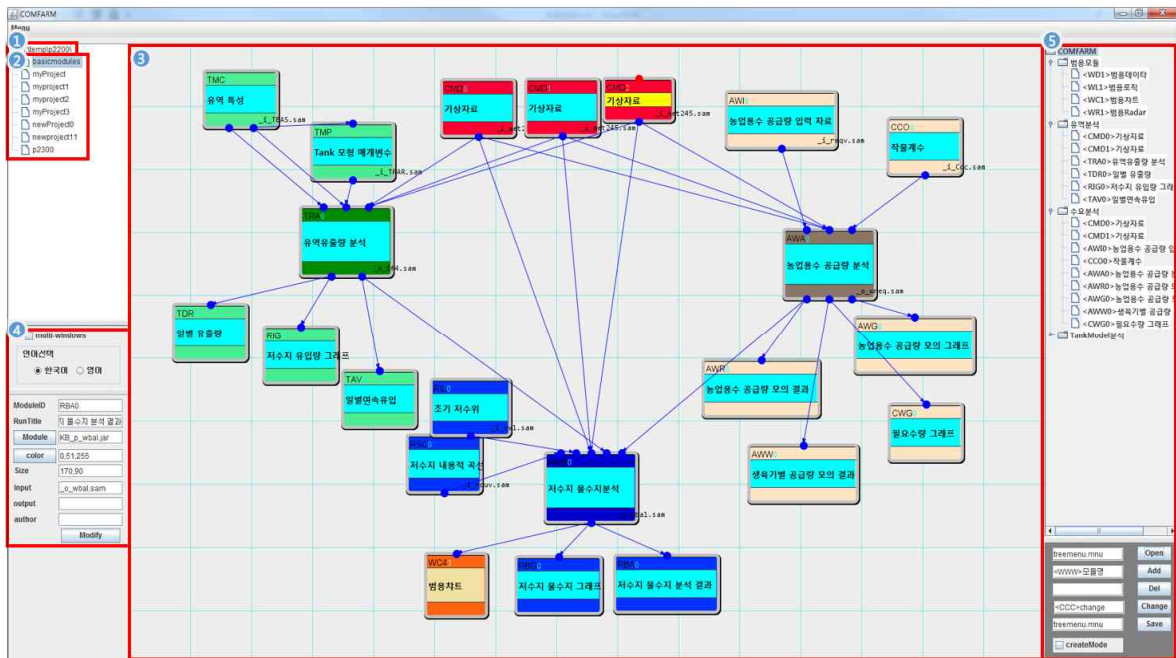


(그림 첨부 II-30) COMFARM 메인화면

CHAPTER 4

COMFARM의 시작

4.1 COMFARM 메인화면

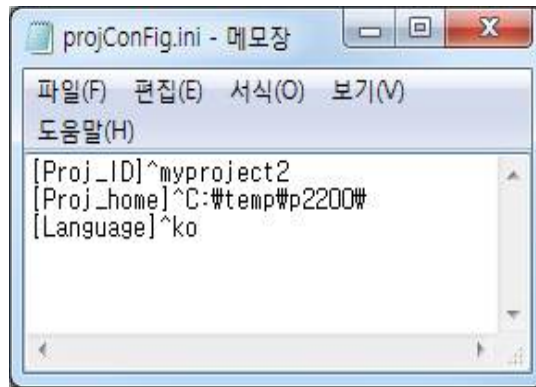


(그림 첨부 II-31) COMFARM 메인화면

- ① 프로젝트들이 저장되어 있는 workspace를 나타내는 부분
- ② 해당 workspace 내 기존 작업 및 새로운 작업 프로젝트들을 나타내는 부분
- ③ 프로그램의 모든 지원하는 모듈들을 구성 및 설계하여 분석하는 부분
- ④ 각 모듈들의 언어설정, 입출력 및 실행모듈을 연결하는 부분
- ⑤ 프로그램에 구성되어 있는 기존 모듈 및 사용자 정의 모듈들을 만드는 부분

4.2 COMFARM 기능

- 플랫폼을 최초 실행시키기 전에 COMFARM 루트 폴더 및 projConFig.ini 파일에서 (그림 첨부 II-32) 와 같이 프로젝트 설정해주어야 함.

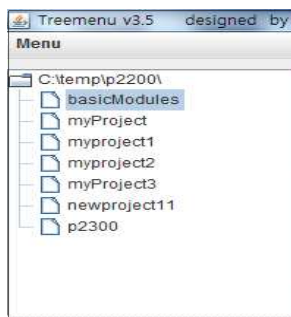


(그림 첨부 II-32) 명칭 입력

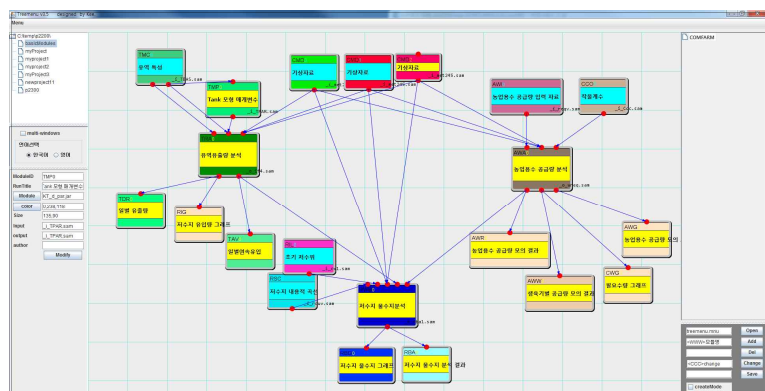
- [Proj_ID]^ 옆에는 프로젝트명을 입력한다. 생성한 프로젝트가 없을 경우 생략 가능함.
- [Proj_home]^ 옆에는 프로젝트들이 저장될 경로를 적어준다. 이 경로는 워크스페이스의 위치가 됨.
- [Language]^ 옆에는 플랫폼 실행 시 모듈명이 한글, 영어로 표출될지 설정한다. ko라고 입력 시 한글로 표출이 되고, eng를 입력 시 영어로 표출이 됨.

가. 프로젝트 선택

- 기존에 작업하던 프로젝트를 불러오려면 (그림 첨부 II-33) 좌측 프로젝트 목록에서 해당 프로젝트를 선택하면 (그림 첨부 II-34) 와 같이 프로젝트를 불러옴.



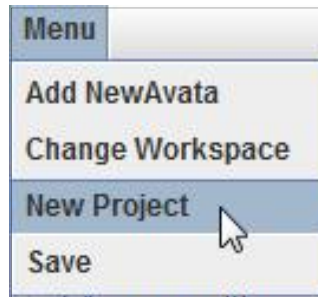
(그림 첨부 II-33)
프로젝트 목록



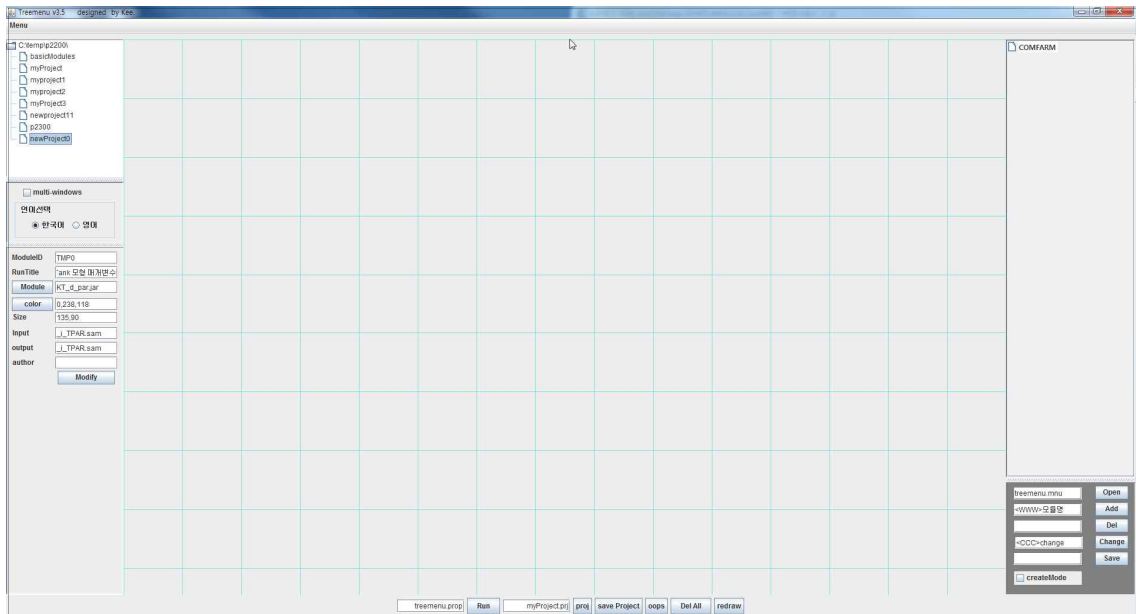
(그림 첨부 II-34) 프로젝트 열기

나. 신규 프로젝트 생성

- 신규 프로젝트를 생성할 때에는 MenuBar에서 [Menu] - [New Project]를 클릭
- (그림 첨부 II-35) 와 같이 좌측 프로젝트 목록에 NewProject[number] 프로젝트가 생기고 빈 작업영역이 생성



(그림 첨부 II-35) Menu Bar



(그림 첨부 II-36) 신규 프로젝트 생성 후 화면

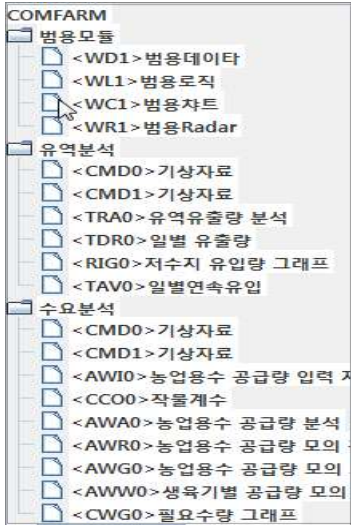
다. 모듈 생성

농촌용수 물순환을 종합적으로 해석하기 위하여 기존 등록된 모듈과 사용자가 만든 모듈을 등록하여 생성할 수 있음.

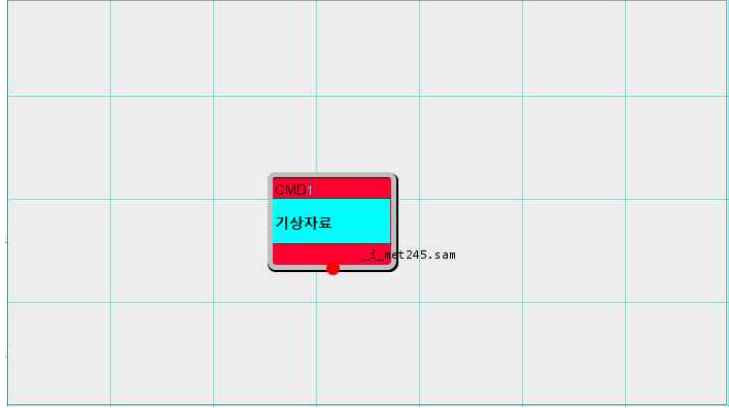
1) 기존 등록된 모듈 생성

- 플랫폼 우측 하단 createMode 체크박스를 체크 상태로 만들고 (그림 첨부 II-37) 플랫폼 우측 모듈리스트에서 생성하려는 모듈을 클릭하고 작업영역

원하는 위치를 클릭하면 (그림 첨부 II-38) 과 같이 모듈이 생성



(그림 첨부 II-37)
모듈리스트

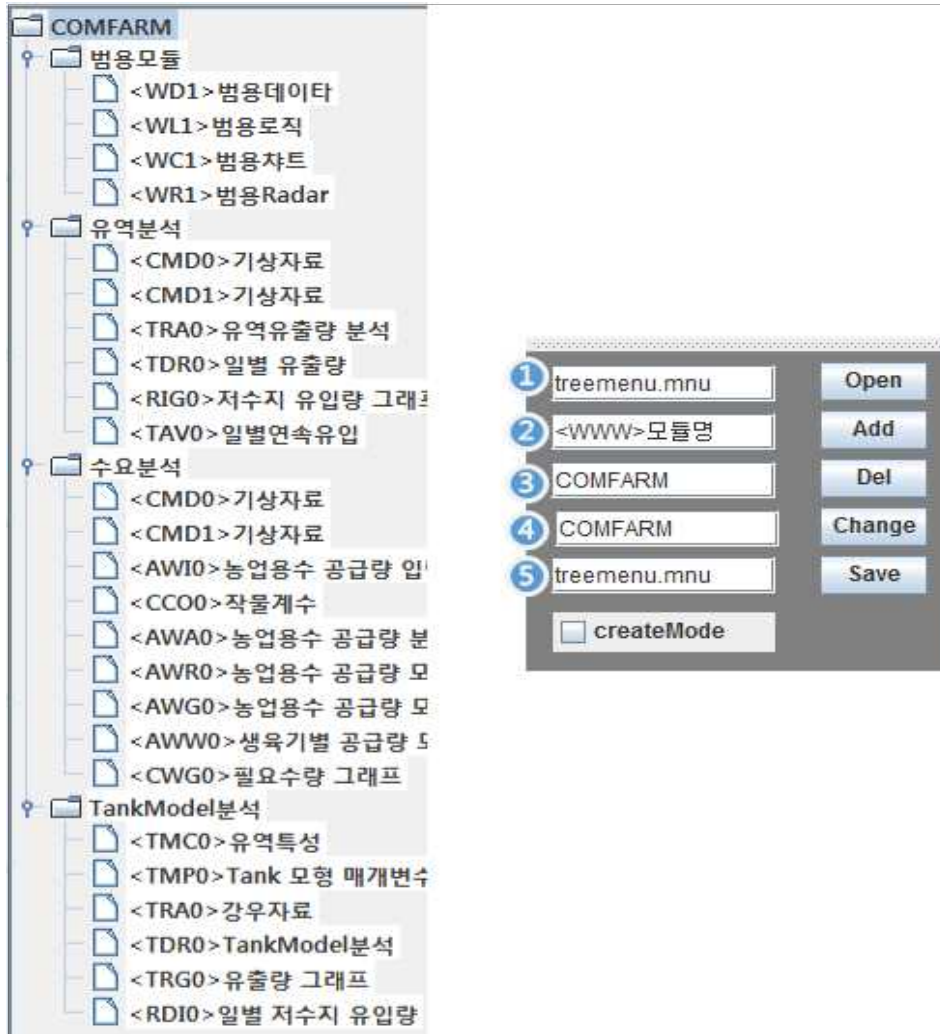


(그림 첨부 II-38) 모듈 생성

* (그림 첨부 II-39)의 메뉴트리 메뉴 열기와 모듈 등록 방법

- 메뉴트리 메뉴 열기와 모듈 등록 방법은 다음 (그림 첨부 II-39)와 같음

- ① 메뉴정보가 저장되어있는 파일명을 적어주고 Open 버튼을 클릭하면 메뉴트리가 열림. 기본적으로 제공하는 메뉴는 treemenu.mnu이며 worksapce 내에 저장되어있음.
- ② 메뉴트리에서 모듈이 저장될 상위 Item을 클릭하고 <WWW> 부분에 모듈의 ID를 적어주고 모듈명 부분에 모듈명을 적어주고 Add버튼을 클릭하면 메뉴트리에 모듈이 등록. 예) 유역분석을 클릭하고 <CMD0>기상자료 Add 하면 유역분석그룹 내에 모듈이 등록.
- ③ 메뉴트리에서 제거하려는 모듈이 있으면 해당 모듈을 클릭하고 Del버튼을 클릭
- ④ 메뉴트리에서 모듈명, ID를 변경하려면 해당 모듈을 클릭하고 모듈명, ID를 수정해주고 Change 버튼을 클릭
- ⑤ 현재의 메뉴트리구조를 저장하려면 입력칸에 메뉴정보가 저장될 파일명을 적어주고 Save버튼을 클릭



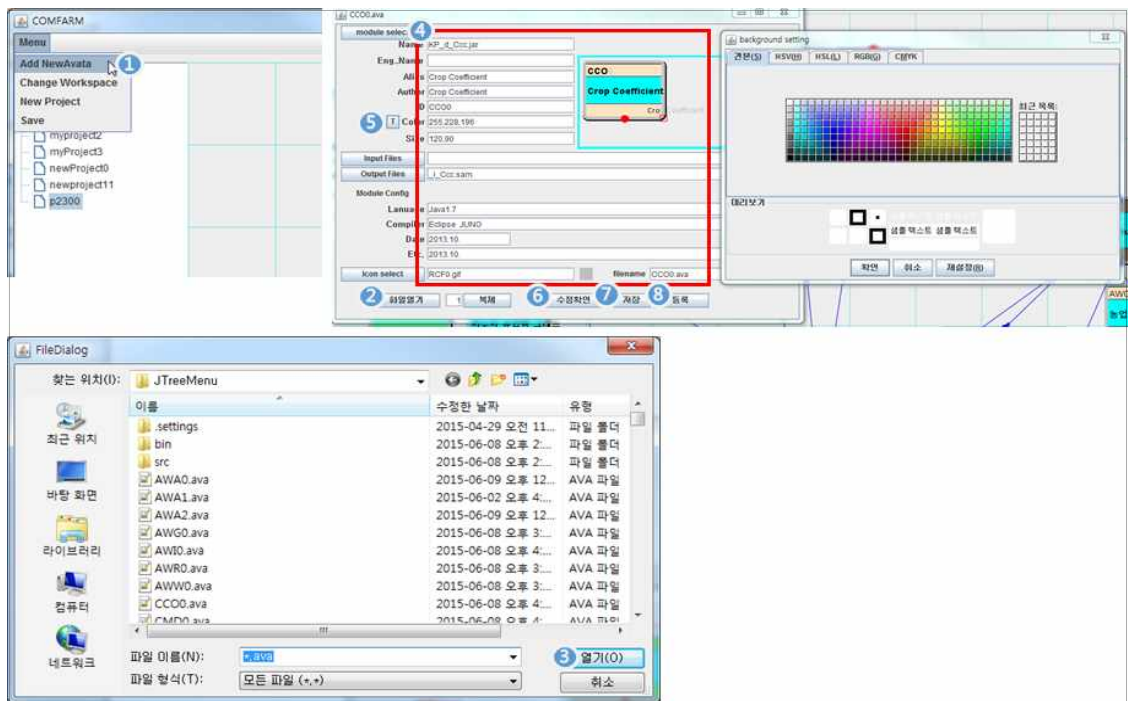
(그림 첨부 II-39) 메뉴트리 모듈 등록

2) 사용자가 만든 모듈 등록

- 농촌용수에 대한 다양한 요소에 능동적으로 대응하여, 농촌용수 분석요소 모듈을 간편하게 하기 위하여 새로운 모듈을 추가로 등록할 수 있음. 플랫폼에 새로운 모듈을 등록하는 과정은 다음과 같으며, (그림 첨부 II-40)에 나타내었음.

- ① 플랫폼 좌측 상단 [Menu]-[Add NewAvata]를 클릭
- ② [화일열기] 버튼을 클릭하면 FileDialog창이 팝업
- ③ 팝업 된 FileDialog창에서 등록하려는 모듈을 선택하고 열기 버튼을 클릭
- ④ Name, Alias, Author, Code, Color, size 등을 수정할 수 있음.
- ⑤ [T] 버튼을 클릭하면 Color를 선택할 수 있는 창이 열리고 Color를 선택할 수 있음.

- ⑥ [수정확인] 버튼을 클릭하면 적용 된 모듈을 확인할 수 있음.
- ⑦ [저장] 버튼을 클릭하여 새로운 모듈의 상태를 저장할 수 있음.
- ⑧ [등록] 버튼을 클릭하면 플랫폼 상단에 있는 툴바에 새로운 모듈이 추가 됨.



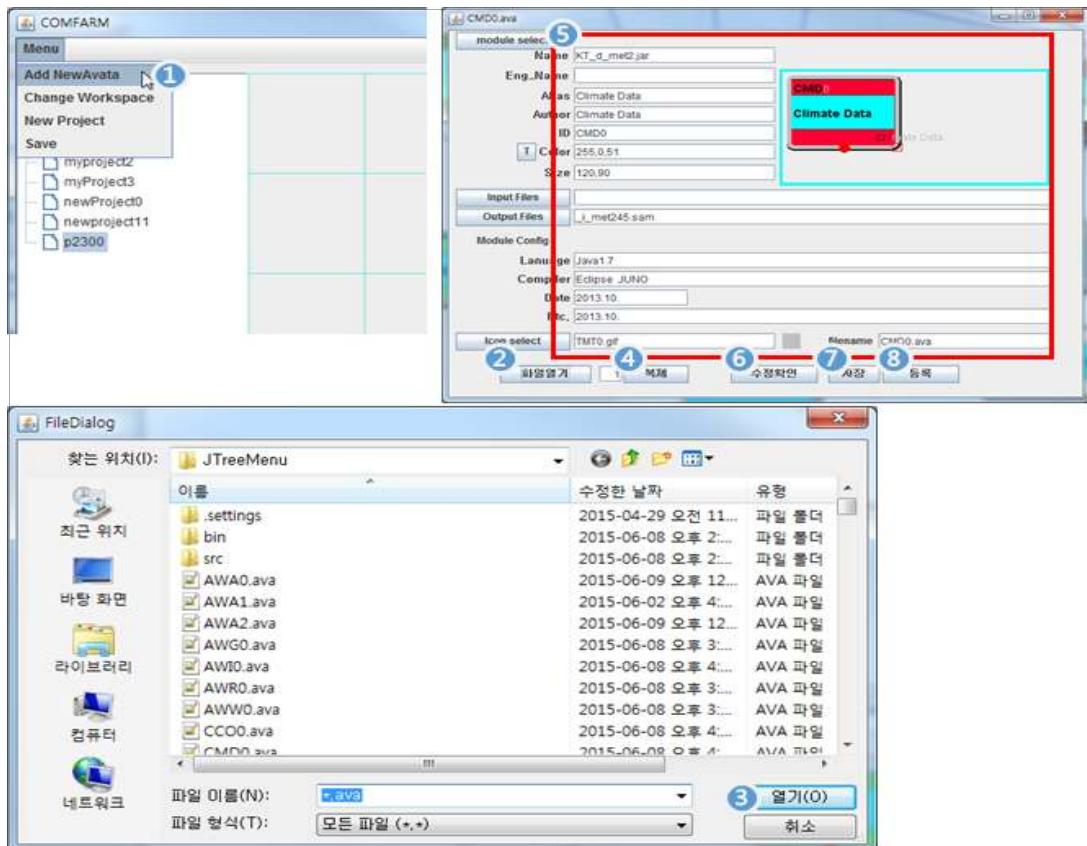
(그림 첨부 II-40) 모듈 등록 예

3) 모듈 복제

- 농촌용수 해석 모델링은 수문, 수리, 수질, 생태계, 나아가 사회 경제적인 요소를 포괄하고 있다. 또한 시간 및 지역적으로 그 특성에 따라 국부적으로 상당히 다른 양상을 띠는 경우가 많다. 이러한 측면에서 문제의 복잡성이나 특징에 따라 해석하는 모형도 능동적으로 구축될 필요가 있음.
- 따라서, 다양하고 복잡한 환경의 농촌용수 해석을 위해서는 분석 요소들을 각각 하나의 해석 단위로 개발하고, 각 요소들을 조합하여 환경에 따른 맞춤형 해석을 수행할 수 있는 프로그램의 개발이 필요
- 2차년도는 분석요소 모듈이 다양하게 조합할 수 있도록 모듈 복제 기능을 추가하였음. 기 작성 된 분석요소 모듈을 환경, 특징에 따라 손쉽게 복제하여 사용이 가능. 모듈 복제 기능은 (그림 첨부 II-41)과 같음.

- ① 플랫폼 좌측 상단 [Menu]-[Add NewAvata]를 클릭
- ② [화일열기] 버튼을 클릭하면 FileDialog창이 팝업
- ③ 팝업 된 FileDialog창에서 복제하려는 모듈을 선택하고 열기 버튼을 클릭

- ④ [복제] 버튼을 클릭하면 모듈이름과 모듈아이콘의 이름에 복제번호가 붙음.
- ⑤ Name, Alias, Author, Code, Color, size 등을 수정할 수 있음.
- ⑥ [수정확인] 버튼을 클릭하면 적용 된 모듈을 확인할 수 있음.
- ⑦ [저장] 버튼을 클릭하여 복제한 모듈을 저장할 수 있음.
- ⑧ [등록] 버튼을 클릭하면 플랫폼 상단에 있는 툴바에 복제 된 모듈이 추가



(그림 첨부 II-41) 모듈 복제 상세 화면

- 모듈 복제기능을 사용한 예는 (그림 첨부 II-42)와 같음.

- ① 농촌용수 물순환의 분석요소들이 다양하게 조합할 수 있도록 유역유입량분석 모듈을 복제하고 저수지 연계 모듈을 새로 추가하여 기존 유역유입량분석 모듈과 복제된 유역유입량분석을 연계하여 물수지를 분석

라. 모듈 이동

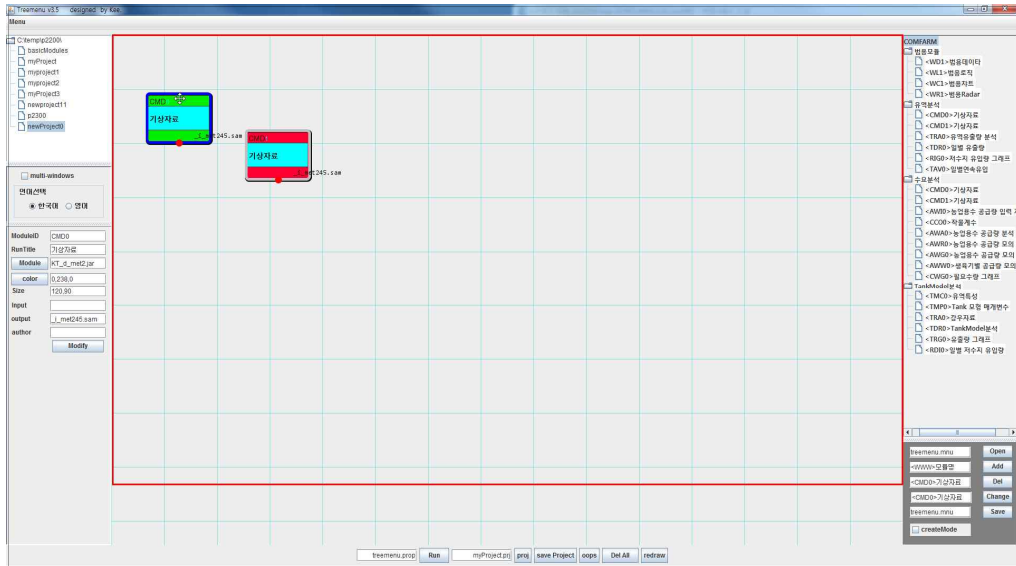
- 작업영역에서 마우스 드래그, 키보드 방향키로 모듈을 이동시켜 원하는 위치에 배치할 수 있음

마. 모듈 제거

- 작업영역에 생성한 모듈 제거는 드래그 및 Delete키로 제거할 수 있음.

1) 드래그 하여 제거

- 제거하는 모듈을 클릭하여 (그림 첨부 II-44) 의 빨간 선 밖 영역으로 드래그하면 작업영역에서 모듈이 제거



(그림 첨부 II-44) 드래그하여 모듈 제거

2) Delete키로 제거

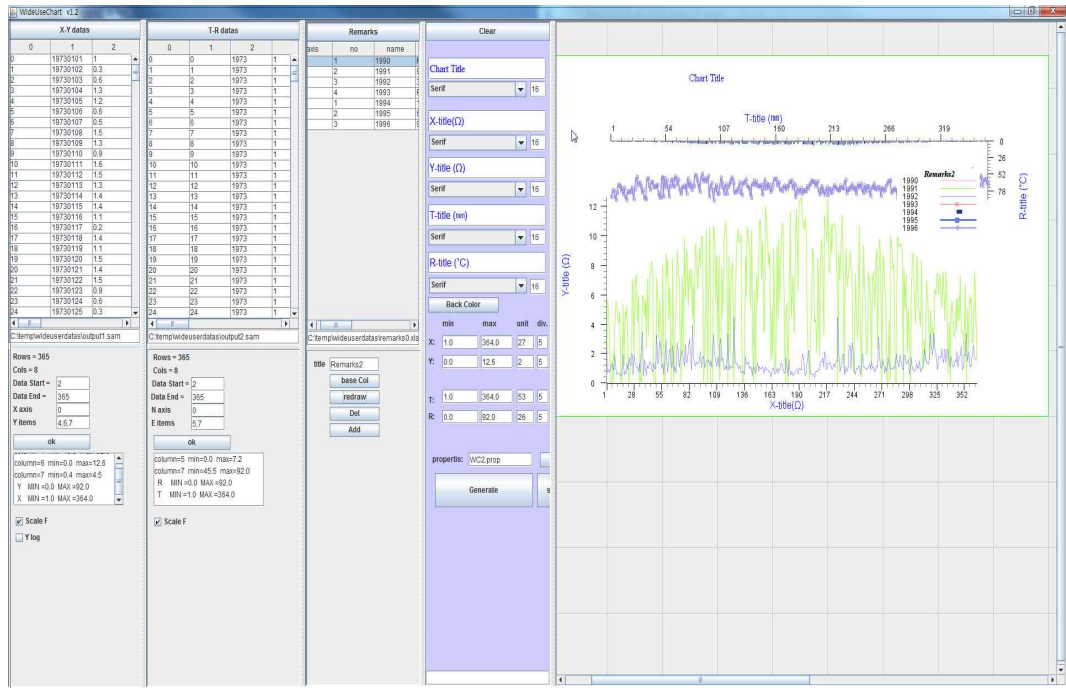
- 제거하려는 모듈을 클릭하여 선택한 후 키보드 Delete키(**Del**)를 누르면 모듈이 작업영역에서 제거

바. 모듈의 실행

- 모듈을 실행시키려면 해당 모듈의 (그림 첨부 II-45)의 빨간선 안쪽을 클릭하면 모듈의 실행창이 열림. (그림 첨부 II-46)은 범용차트 모듈의 실행창이 열린 화면임.



(그림 첨부 II-45) 모듈 실행 영역



(그림 첨부 II-46) 범용차트 모듈의 실행화면

사. 모듈 정보 확인

- 현재 클릭한 모듈에 대한 모듈명, 모듈ID, Input data, Output data 등 정보를 보여줌. 모듈 하단에 마우스를 올려두면 마우스 커서 모양이 (그림 첨부 II-47)과 같이 돋보기 모양으로 바뀌고 클릭을 하면 (그림 첨부 II-48)과 같이 플랫폼 좌측 하단에 모듈정보가 표출. 모듈 정보 표출 부분에서 정보를 수정하고 Modify 버튼을 클릭하면 수정 한 정보가 모듈ID.ava 파일에 저장



(그림 첨부 II-47) 모듈정보확인 영역

ModuleID	WL3
RunTitle	범용로직
Module	WideUseLogic.jar
color	255,100,20
Size	100,100
Input	iWL3
output	oWL3
author	
<input type="button" value="Modify"/>	

(그림 첨부 II-48) 모듈정보표출

아. 모듈 간 Input, Output Data의 연결 관계

- 기본적으로 모듈간의 입출력 데이터의 연결 관계는 모듈 ID.ava 파일에 명시되어 있는 정보로 연결 관계가 구성되며, 작업영역에서 모듈간의 연결 관계는 파란색 방향화살표로 표시
- 입출력 데이터는 (그림 첨부 II-49)와 같이 workspace 내에 프로젝트명_입출력파일명 형태로 위치

basicmodules_i_Ccc.sam	2014-03-28 오후...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_cwl.sam	2014-03-27 오후...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_met245.sam	2013-06-03 오전...	SAM 파일	473KB
basicmodules_i_rcuv.sam	2014-03-27 오후...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_reqv.sam	2014-03-31 오후...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_TBAS.sam	2013-11-19 오후...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_TDUR.sam	2015-05-12 오전...	SAM 파일	1KB
basicmodules_i_TINF.sam	2015-05-12 오전...	SAM 파일	75KB
basicmodules_i_TMET.sam	2014-03-21 오후...	SAM 파일	17KB

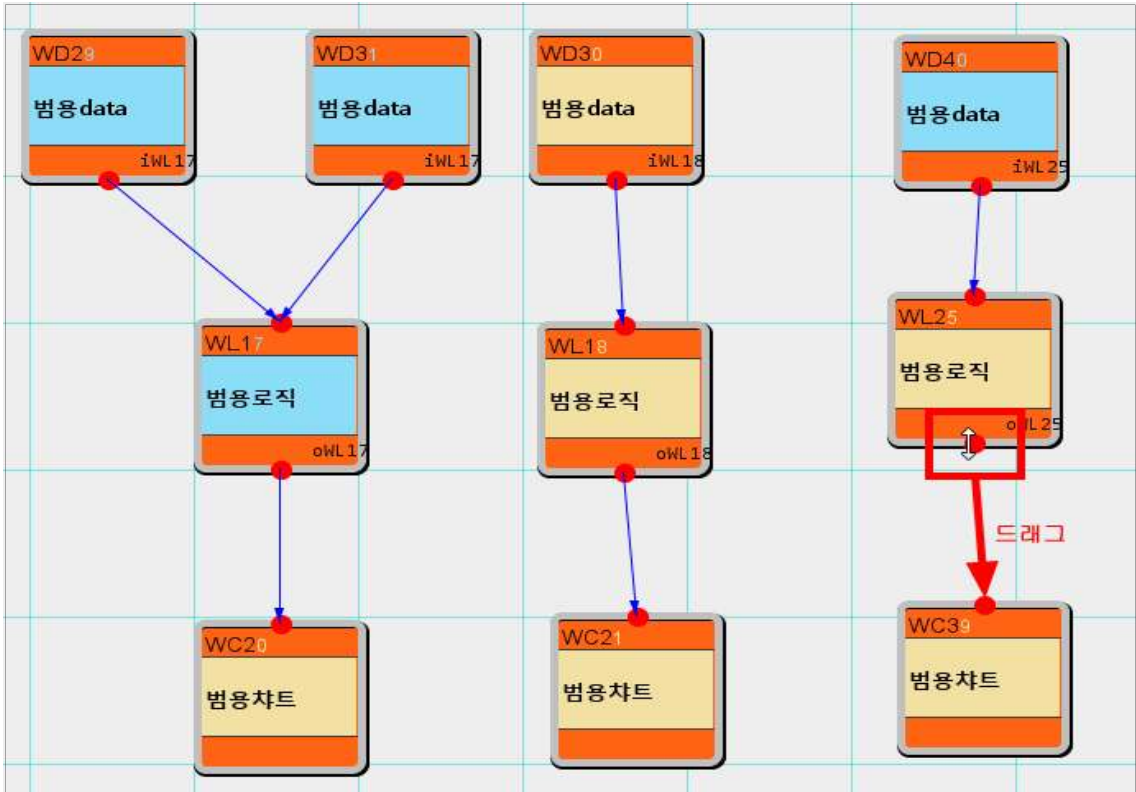
(그림 첨부 II-49) 입출력 데이터

- (그림 첨부 II-50)과 같이 데이터 존재 유무에 따라 모듈 하단의 포인트 색이 다르다. 데이터가 있을 경우 파란색, 없을 경우에는 빨간색으로 표시



(그림 첨부 II-50) 데이터 존재
유무확인

- 범용 모듈 경우에는 (그림 첨부 II-51)과 같이 모듈 하단 빨간 점에 마우스를 올려두면 마우스 커서 모양이 상하방향 커서 모양으로 바뀌고 연결하려는 모듈로 드래그를 하면 연결



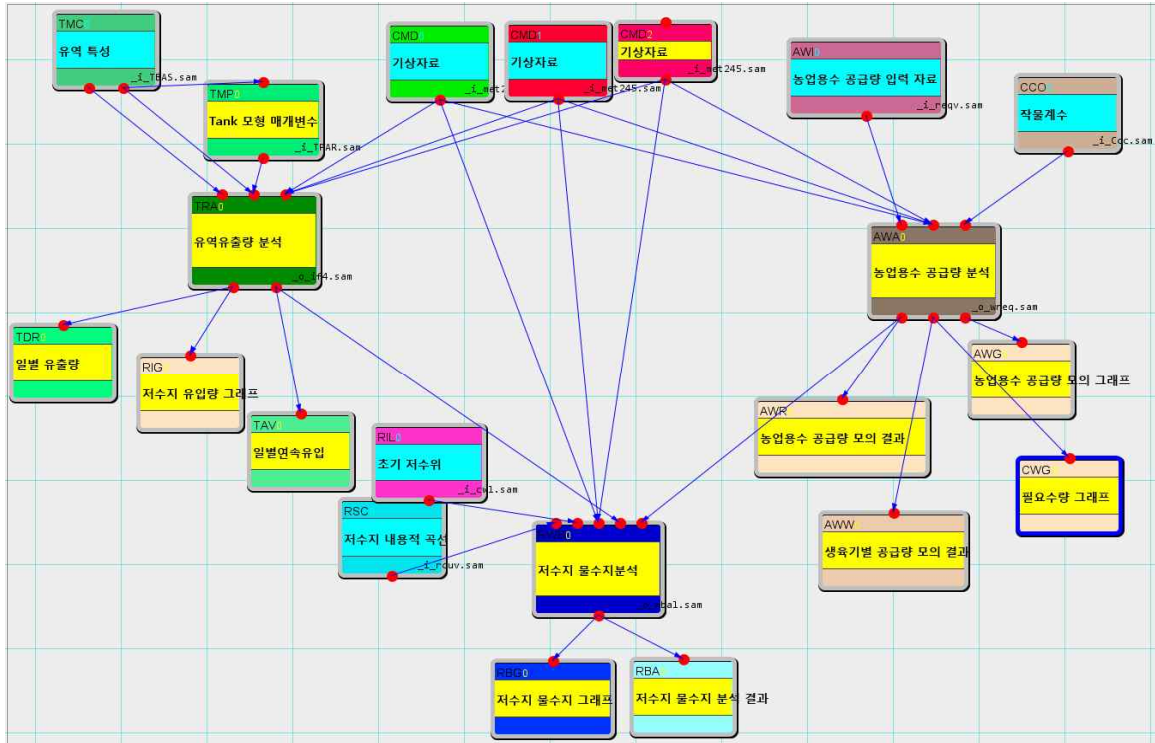
(그림 첨부 II-51) 범용모듈 데이터 연결

자. 모듈명 한글/영어 설정

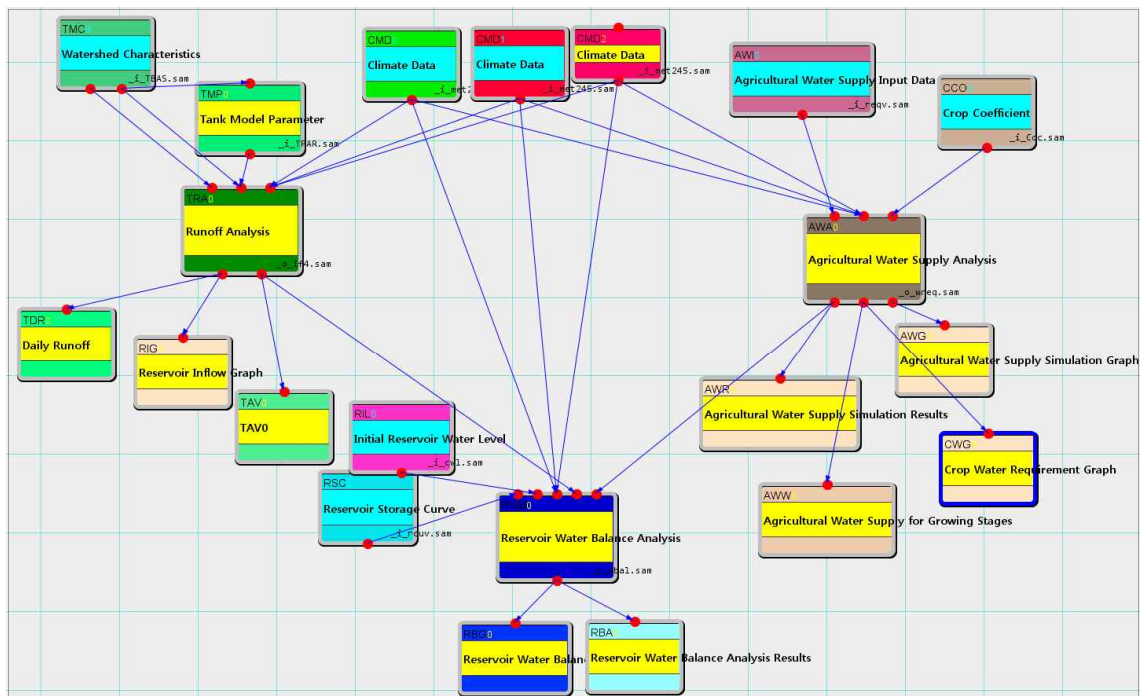
- 모듈명을 (그림 첨부 II-52)의 라디오버튼을 선택하여 한글, 영어를 선택하여 표출 시킬 수 있음.
- (그림 첨부 II-54)은 한글을 선택한 화면 (그림 첨부 II-54)는 영어를 선택한 화면



(그림 첨부 II-52) 한글/영어 선택



(그림 첨부 II-53) 한글을 선택했을 경우 화면



(그림 첨부 II-54) 영어를 선택했을 경우 화면

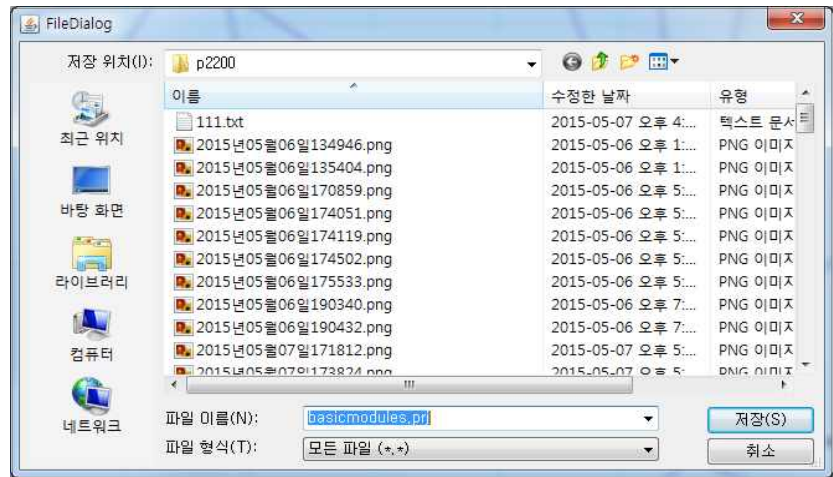
차. 프로젝트 저장

- 프로젝트의 모듈 생성, 이동, 삭제의 상태를 저장할 수 있음.

- (그림 첨부 II-55) MenuBar에서 [Menu] - [Save]를 클릭하면 (그림 첨부 II-56)과 같이 파일다이얼로그가 열리며 지정한 경로에 프로젝트명.prj 파일에 상태가 저장이 됨.



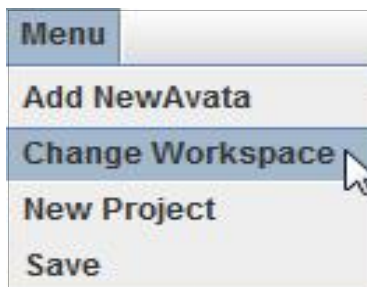
(그림 첨부 II-55)
MenuBar



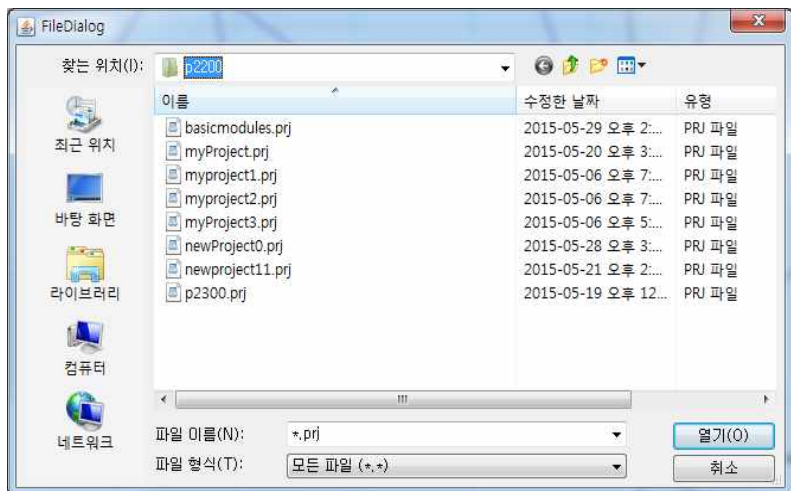
(그림 첨부 II-56) 저장파일 다이얼로그

카. 워크스페이스 변경

- 워크스페이스란 프로젝트들이 저장된 공간을 의미함. 워크스페이스를 변경하려면 (그림 첨부 II-57) [Menu] - [Change Workspace]를 클릭하면 (그림 첨부 II-58)과 같이 파일다이얼로그가 열리며 지정한 경로로 플랫폼이 재부팅 되면서 워크스페이스가 변경



(그림 첨부 II-57) MenuBar



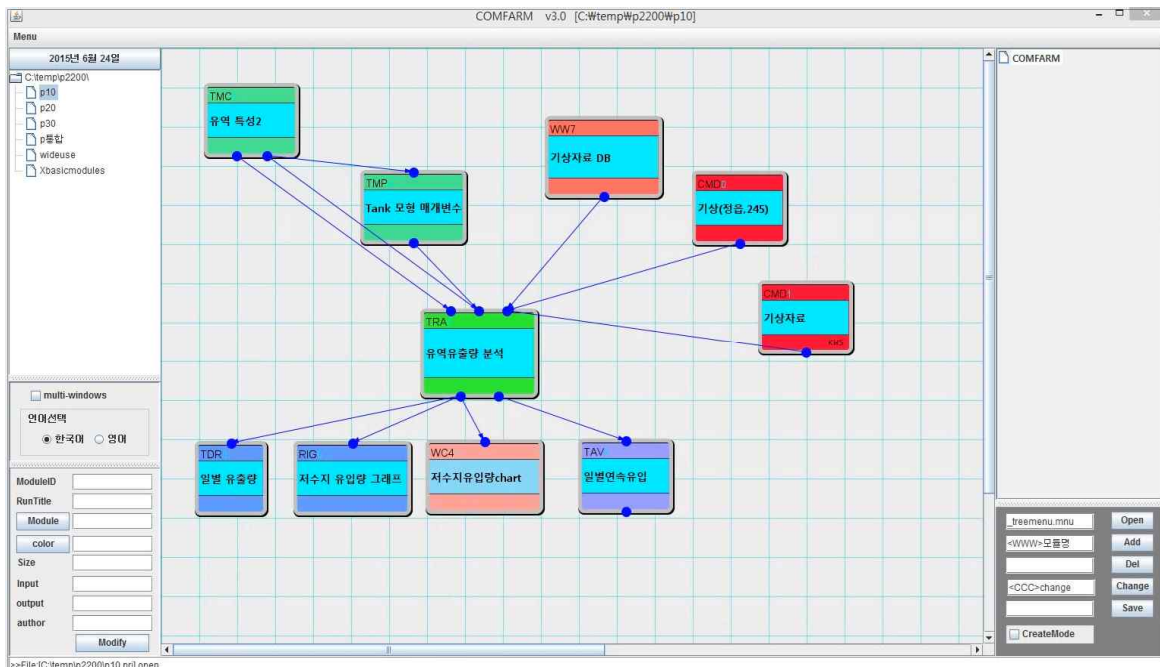
(그림 첨부 II-58) 위치변경 파일 다이얼로그

CHAPTER 5

모듈의 실행

5.1 유역유출량 분석

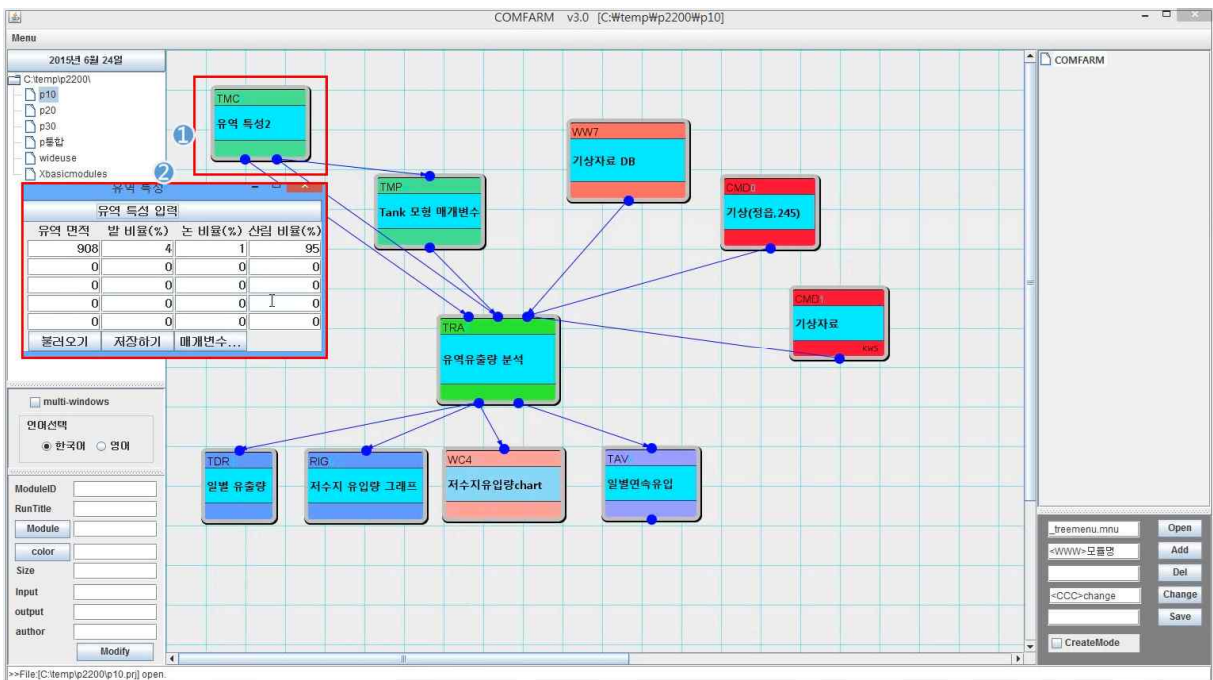
- 유역유출량 분석은 다음 (그림 첨부 II-59)와 같음.
- 메인 화면 오른쪽의 모듈 리스트를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 등록
- 메인 화면 왼쪽의 모듈 연결 메뉴를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 연결
- 모듈 등록 및 연결 등 모듈 관련 상세 내용은 chapter 4 참고



(그림 첨부 II-59) 유역유출량 분석

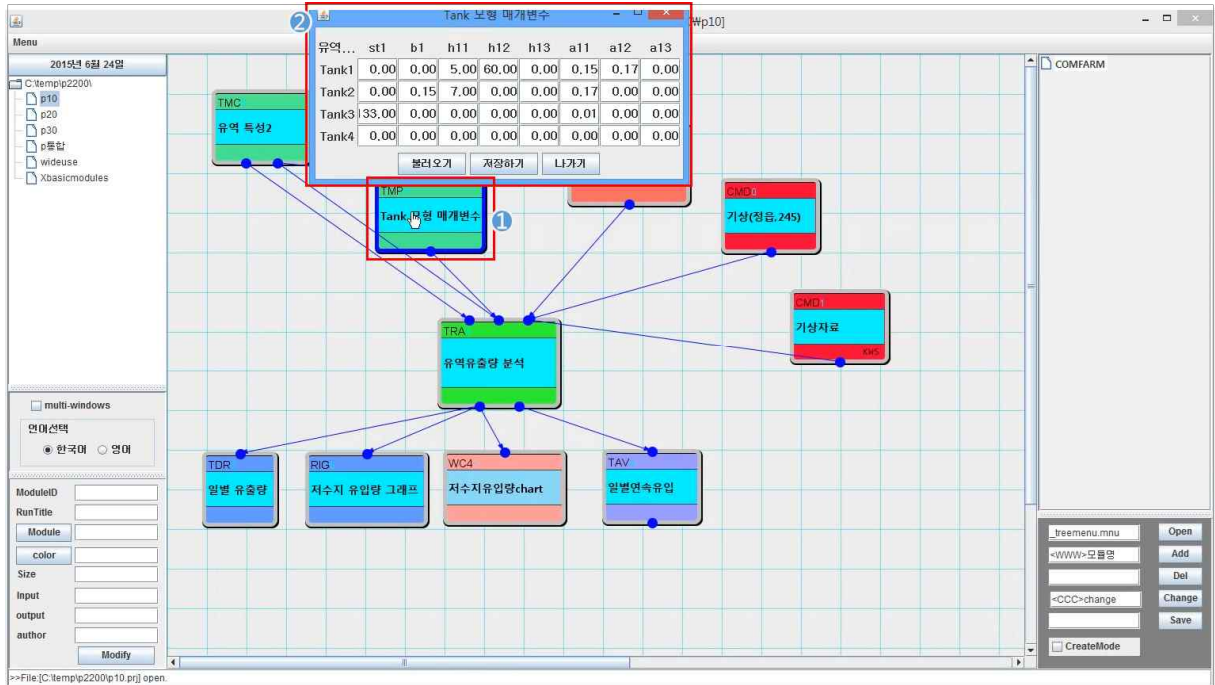
가. 입력자료

- 유역유출량 분석은 유역특성, Tank모형 매개변수, 기상자료 총 3개의 입력 자료를 요구함.
- 유역특성 자료는 (그림 첨부 II-60)과 같이 유역면적 (ha), 밭, 논, 산림비율 (%)이 각 소유역에 대하여 입력됨.
- 또한 불러오기 기능을 이용하여 txt, csv 등 다양한 형식의 파일 포맷을 유역특성 입력자료로 불러올 수 있음.



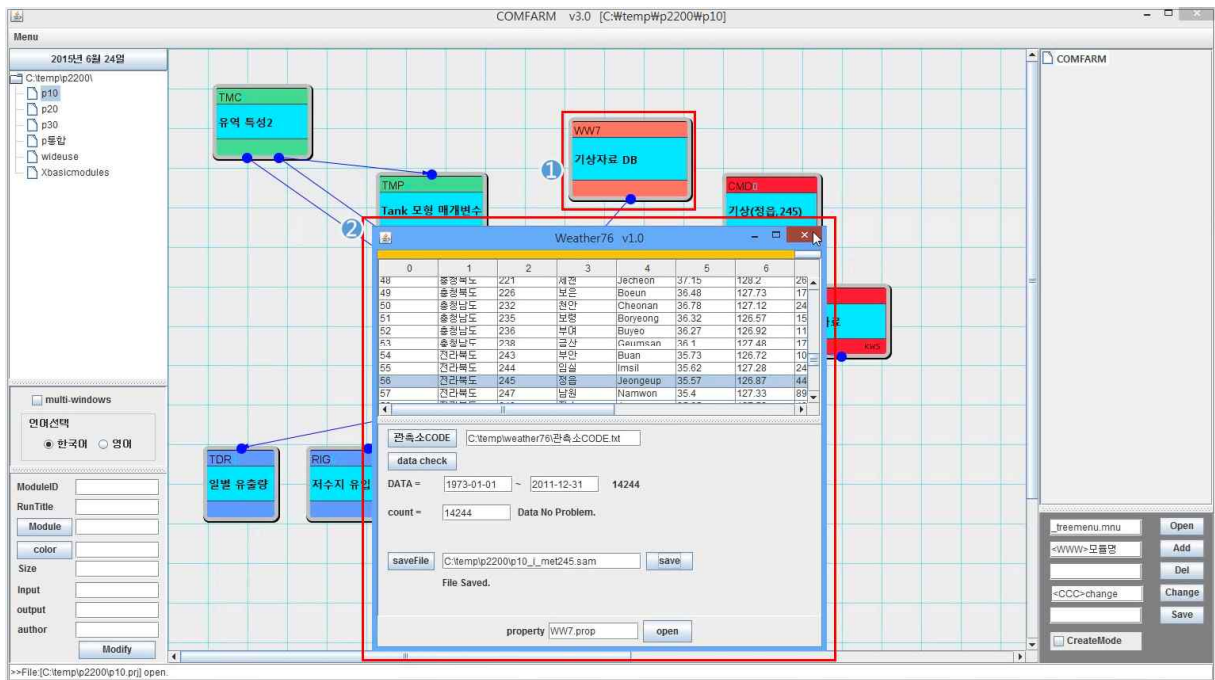
(그림 첨부 II-60) 유역특성 입력자료

- Tank모형 매개변수는 총 4단 Tank모형을 모의할 수 있도록 함((그림 첨부 II-1)).
- 각 탱크별로 저류량 및 유출계수 각 1개, 유출고 및 저류계수 각 3개씩 설정할 수 있는 입력자료 지원. ((그림 첨부 II-4) 참고)
- 각 Tank에 대하여 유출고 및 저류계수가 3개 미만일 경우 그에 해당하는 매개변수만 입력하여 모의.
- 일반적으로 3단 Tank모형 적용 시, Tank4 부분의 매개변수들은 0으로 처리하고 Tank3의 유출계수 (b1), 유출계수 (h2, h3), 저류계수 (a2, a3)도 0으로 처리하는 방식으로 3단 Tank를 모의
- 이러한 방식으로 매개변수를 설정하여 1~4단 Tank모형의 모의 가능
- 또한 불러오기 기능을 이용하여 txt, csv 등 다양한 형식의 파일 포맷을 Tank모형 매개변수 입력자료로 불러올 수 있음.



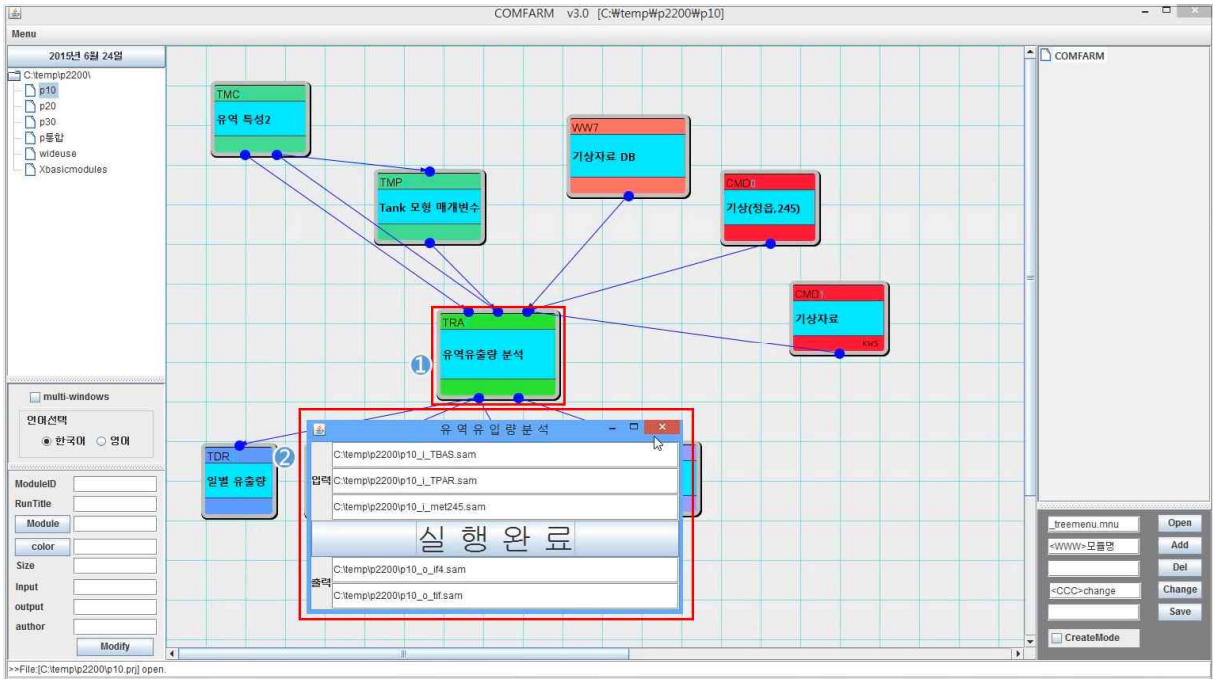
(그림 첨부 II-61) Tank모형 매개변수 입력

- 기상자료 입력부분에서는 기상관측소 제원을 입력하기 위해 관측소코드, 지역, 관측소명, 위경도, 해발고도 등의 자료와 강우, 증발, 풍속, 일조시간, 습도 등의 기상자료를 txt, csv를 통해 불러올 수 있음.
- 입력된 자료는 data check를 통해 기간 및 개수를 사전 확인 가능



(그림 첨부 II-62) 기상자료 입력

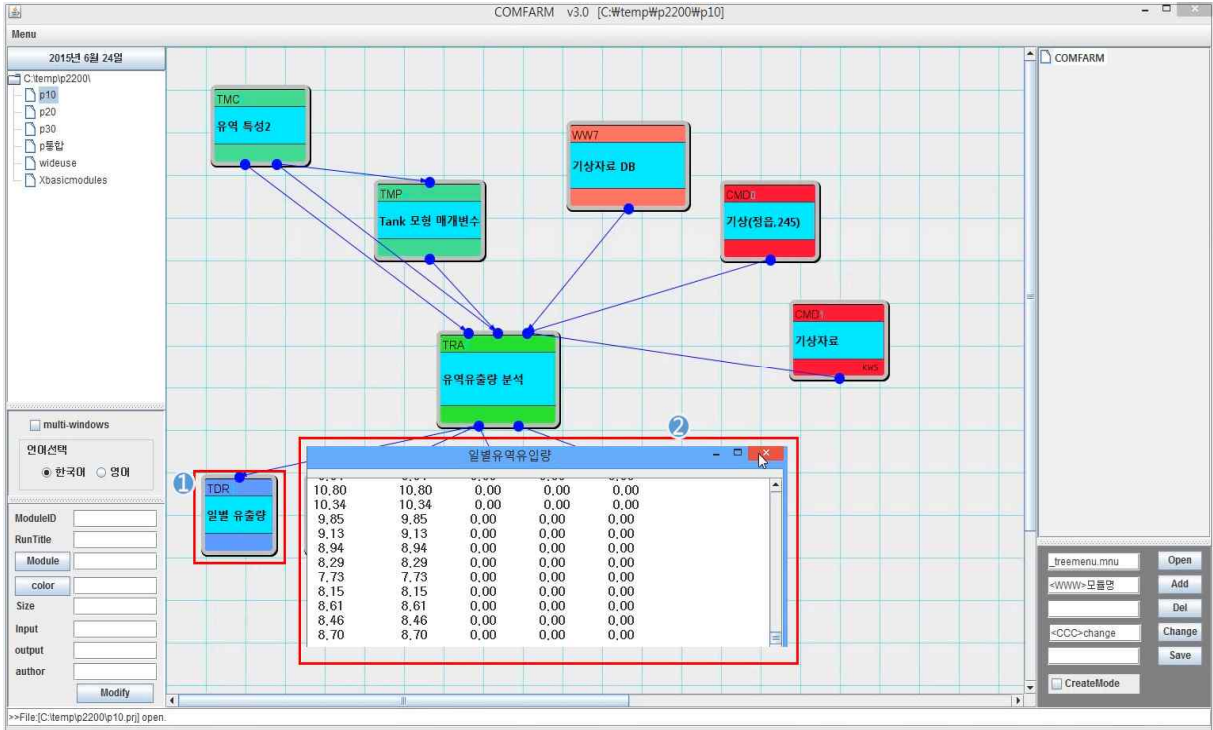
- 입력자료 설정이 완료된 후 유역유출량 분석 모듈을 클릭하면 설정된 입력 자료 리스트가 보여지고 실행완료 버튼을 클릭하면 출력될 모듈의 리스트가 호출됨 ((그림 첨부 II-63)).



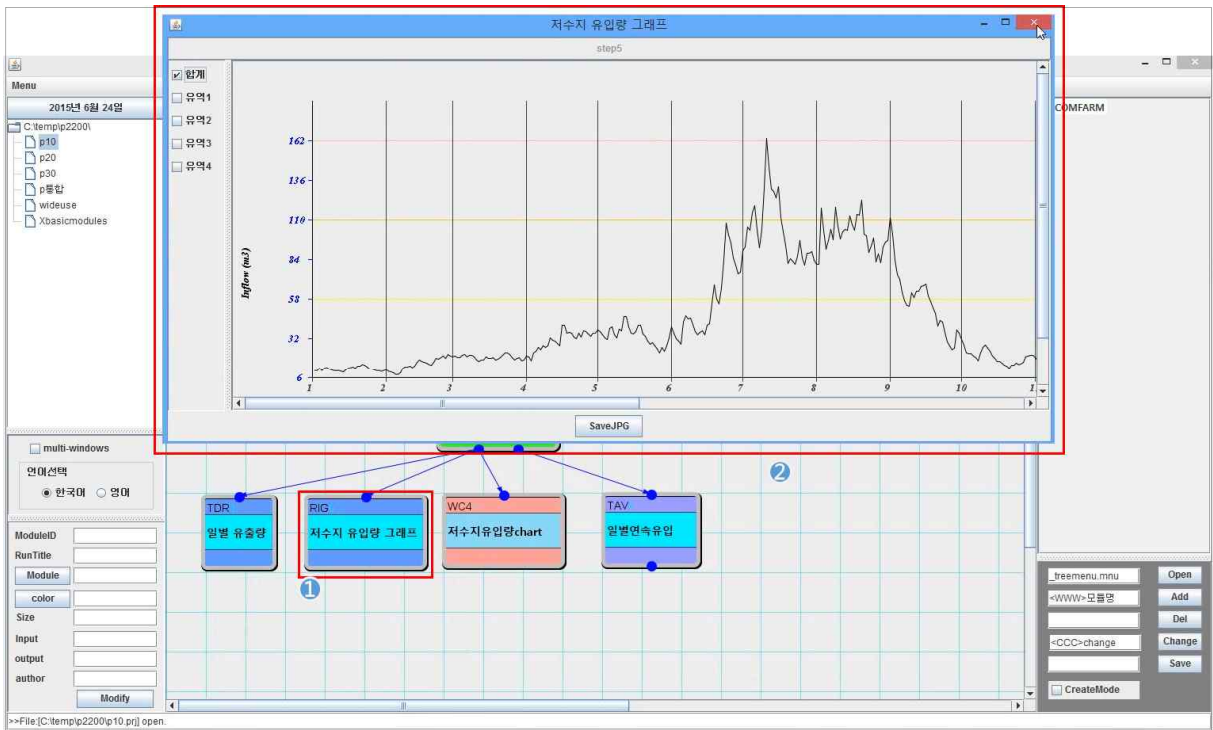
(그림 첨부 II-63) 유역유출 분석 실행

나. 출력자료

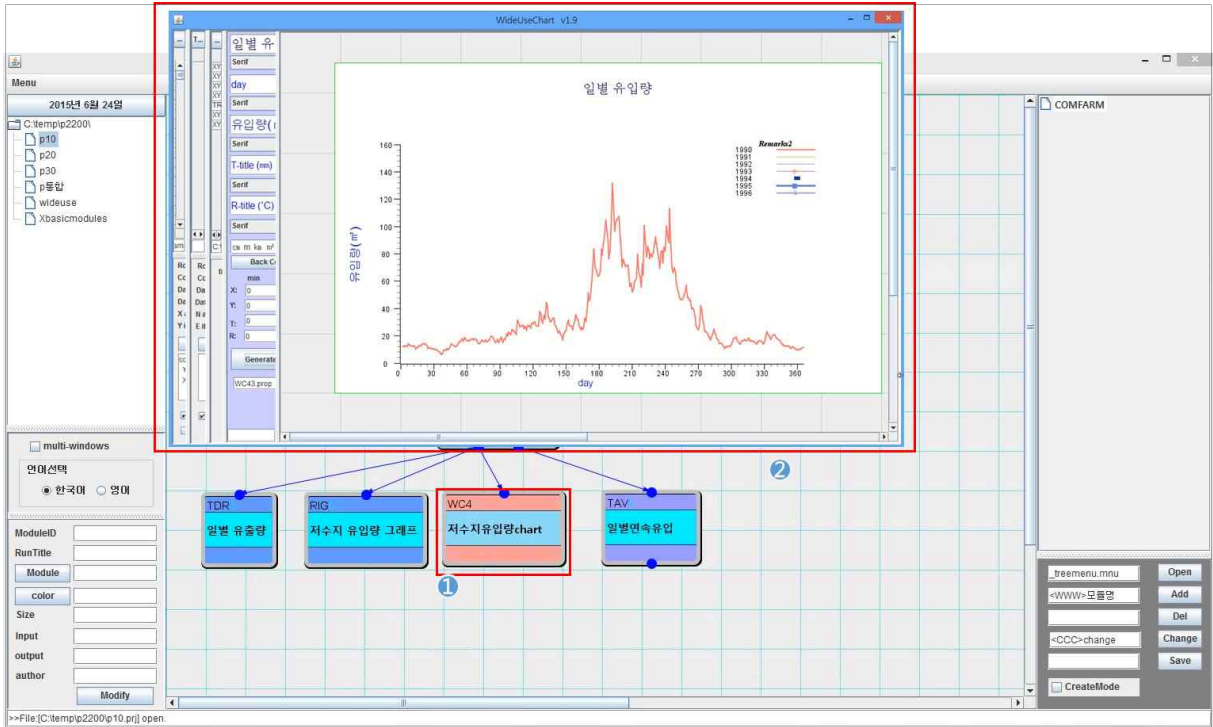
- 유역유출량 분석의 출력자료는 일별유출량, 저수지 유입량그래프 (일반 및 범용 차트)가 있음.
- 일별유출량 출력자료는 대상유역 일별 총유출량과 각 소유역에 대한 일별 유출량 결과를 확인 가능 ((그림 첨부 II-64)).
- 저수지 유입량 그래프 출력자료는 대상유역 및 각 소유역에 대한 일별의 연속적인 저수지 유입량을 그래프로 도식화 함 ((그림 첨부 II-65)).
- 대상유역 및 각 소유역의 저수지 유입량을 비교하기 위해 다중선택을 가능하게 함으로서 그래프 상에서 유역별 그래프를 중첩하여 표출하는 것이 가능.
- 범용차트용 저수지 유입량 그래프 출력자료 부분은 저수지 유입량 결과를 범례 및 X, Y 최대최소값, 그래프 색상 등을 사용자가 원하는 형식으로 변경하여 보고서나 논문 등에 활용할 수 있도록 지원해 줌 ((그림 첨부 II-66)).
- 범용차트용 저수지 유입량 그래프에서 x-y축에 출력할 분석모듈의 output 파일을 X-Y datas 버튼을 클릭하여 불러와서 그래프 x-y축에 출력할 데이터의 시작, 끝 로우와 데이터 컬럼을 지정함으로써 선택적 표출 가능.



(그림 첨부 II-64) 일별유출량 결과



(그림 첨부 II-65) 저수지 유입량 그래프 결과



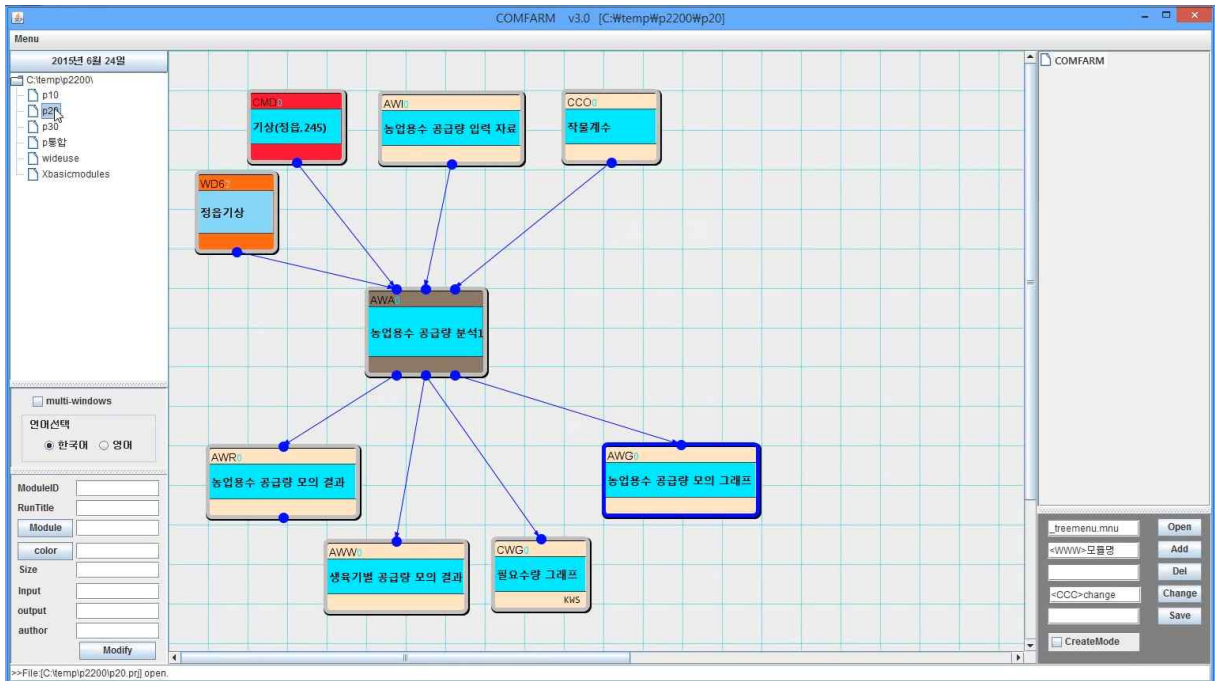
(그림 첨부 II-66) 저수지 유입량 그래프(범용차트) 결과

5.2 농업용수 공급량 분석

- 용수공급량 분석은 다음 (그림 첨부 II-67)과 같음.
- 메인 화면 오른쪽의 모듈 리스트를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 등록
- 메인 화면 왼쪽의 모듈 연결 메뉴를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 연결
- 모듈 등록 및 연결 등 모듈 관련 상세 내용은 chapter 4 참고

가. 입력자료

- 유역유출량 분석은 기상자료, 용수공급량 입력자료, 작물계수 총 3개의 입력자료를 요구함.
- 기상자료 입력부분에서는 강우, 증발, 풍속, 일조시간, 습도, 기온 등의 기상자료를 txt, csv를 통해 불러올 수 있음.
- 또한 불러오기 기능을 이용하여 txt, csv 등 다양한 형식의 파일 포맷을 유역특성 입력자료로 불러올 수 있음.
- 용수공급량 입력자료 부분에서는 관측소 제원, 관개면적, 포장관리, 작부시기와 같은 용수공급량 산정에 필요한 매개변수들을 설정하는 곳으로서 관측소 제원에서는 해당 관측소의 위도, 경도, 표고, 풍속계 높이를 설정함으로써 증발산량 산정에 필요한 매개변수를 지정함.



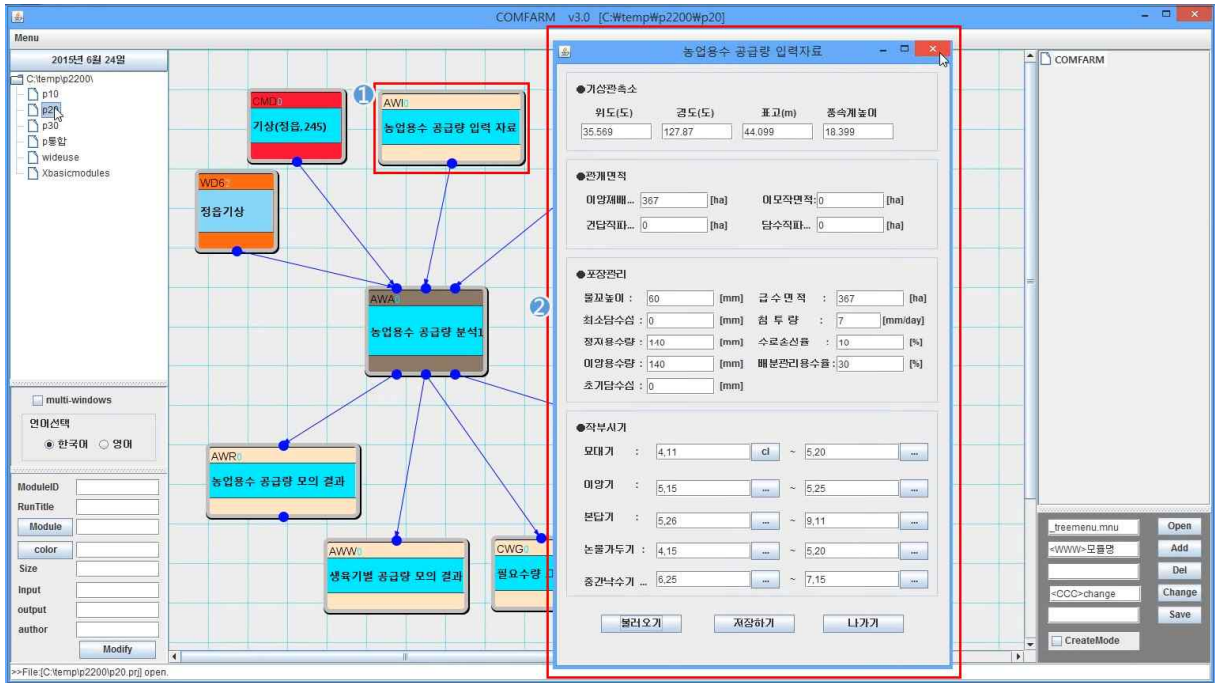
(그림 첨부 II-67) 농업용수 공급량 분석

월	일	강우량(mm)	증발량(mm)	평균기온(°C)	상대습도(%)	일조시간(hr)	풍속(m/s)
2	14	0	1.2	1.7	69.6	3.9	1
2	15	0	1.5	-1.7	49.1	6.6	2.6
2	16	0	1.2	-4.9	53	6.8	2.2
2	17	0	1	-4.9	66.5	4.2	1.5
2	18	0	0.8	-1.9	72.4	0.4	1
2	19	0	0.8	-3.1	71.5	5.4	0.8
2	20	0	0.9	-2.3	66.5	5.9	0.6
2	21	0	0.6	-0.7	74.4	0	0.6
2	22	0.3	1.5	-3.4	61.5	7.7	2.8
2	23	0	1	-7.3	56	8	1.1
2	24	1.5	0.8	-4.8	64.4	6	1.7
2	25	0	1.1	-6	61.8	6.4	1.7
2	26	0	1.4	-6.5	48.9	6.6	1.9
2	27	0	1.1	-4.4	47.5	6.6	1.2
2	28	0	0.9	-2.3	63.9	6.2	0.8
2	29	0	1	-2.5	72.3	4.3	1.2
2	30	0	1	-5.5	67	6.3	0.8
2	31	0	0.5	-4	69.9	3.8	0.9

(그림 첨부 II-68) 기상 입력자료

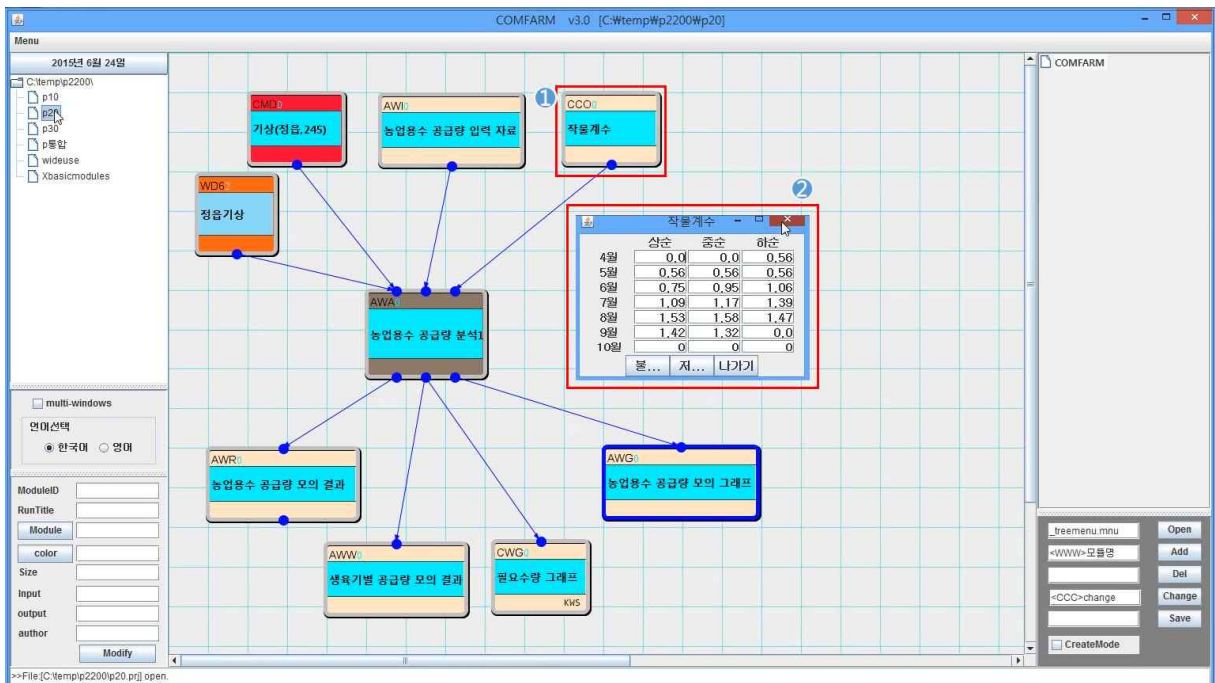
- 관개면적 부분에서는 대상구역 내 관개면적을 이양재배, 이모작, 건답직파, 담수직파 등 총 4개의 논벼 재배 방법 각각 그 값을 입력토록 되어있음
- 농업용수 공급량 분석 모듈은 기상자료, 작물계수, 그리고 농업용수 공급량 입력

자료 모듈과 연동되어 농업용수 공급량을 모의함



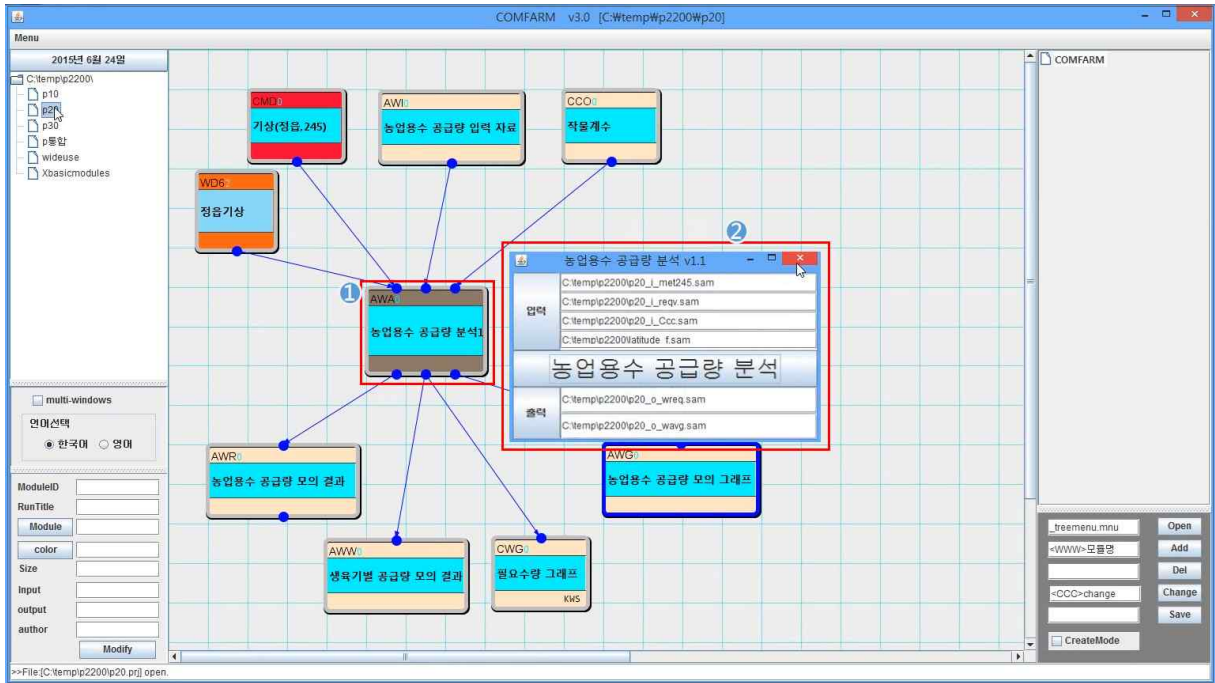
(그림 첨부 II-69) 농업용수 공급량 입력자료

- 작물계수 부분에서는 논벼의 순별 작물계수를 입력함



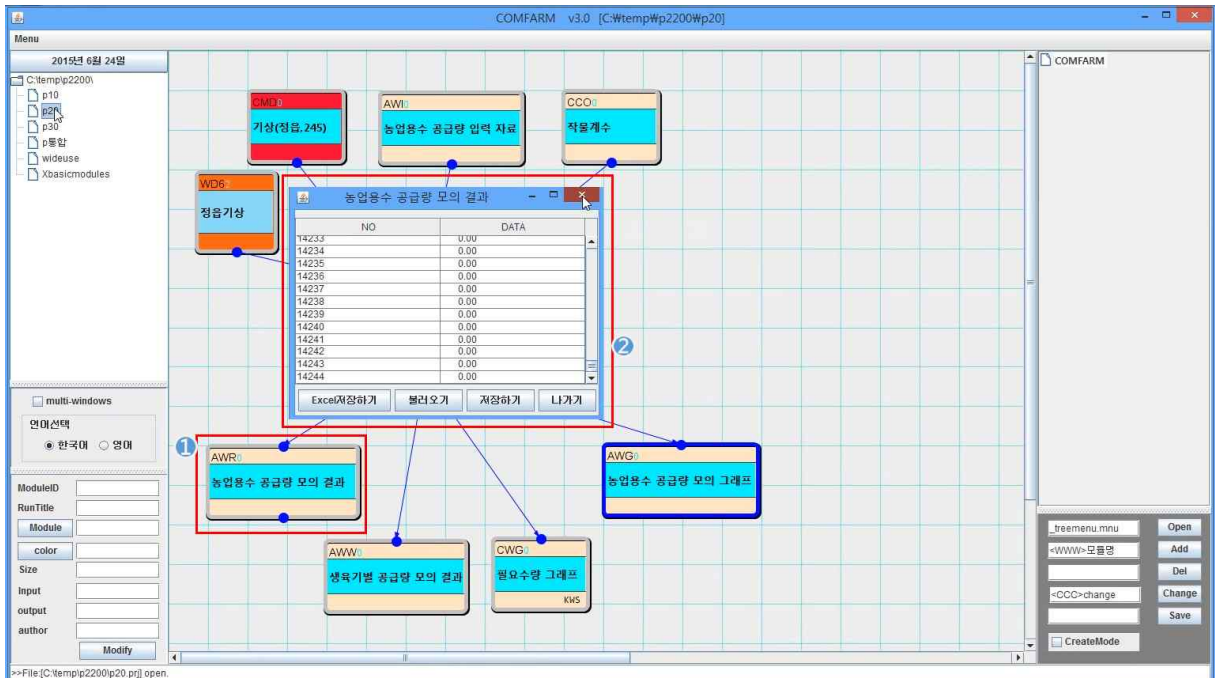
(그림 첨부 II-70) 작물계수 입력자료

- 입력자료 설정이 완료된 후 유역유출량 분석 모듈을 클릭하면 설정된 입력자료 리스트가 보여지고 실행완료 버튼을 클릭하면 출력될 모듈의 리스트가 표출됨



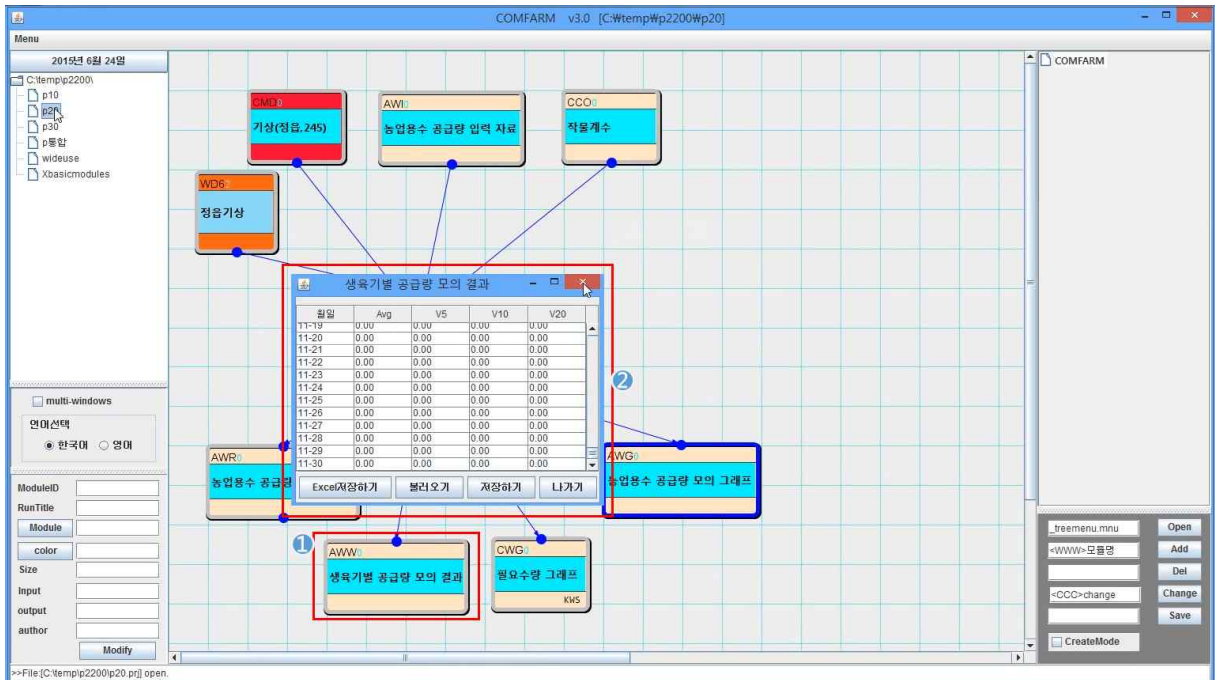
(그림 첨부 II-71) 농업용수 공급량 분석 실행 모듈

나. 출력자료

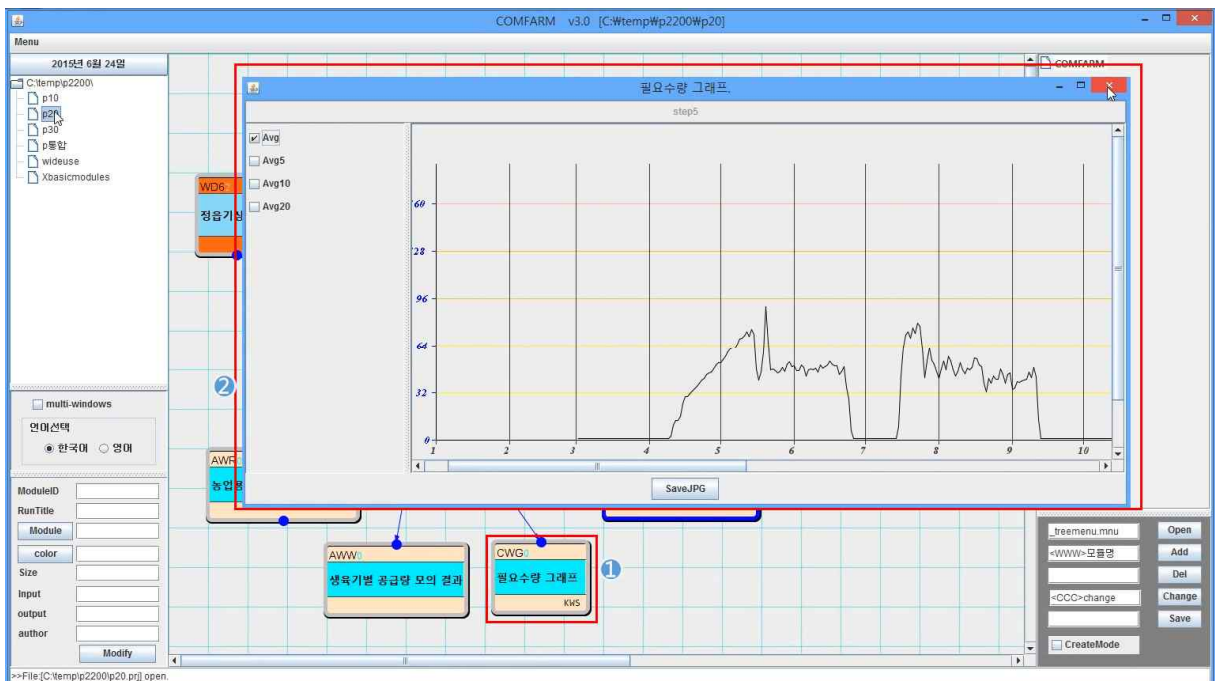


(그림 첨부 II-72) 농업용수 공급량 모의 결과

- 농업용수 공급량 출력자료는 농업용수 공급량 모의 결과, 생육기별 공급량 모의 결과, 필요수량 그래프, 농업용수 공급량 그래프가 있음
- 농업용수 공급량 모의 결과는 일별 용수공급량 테이블로 나열된 값을 보여줌

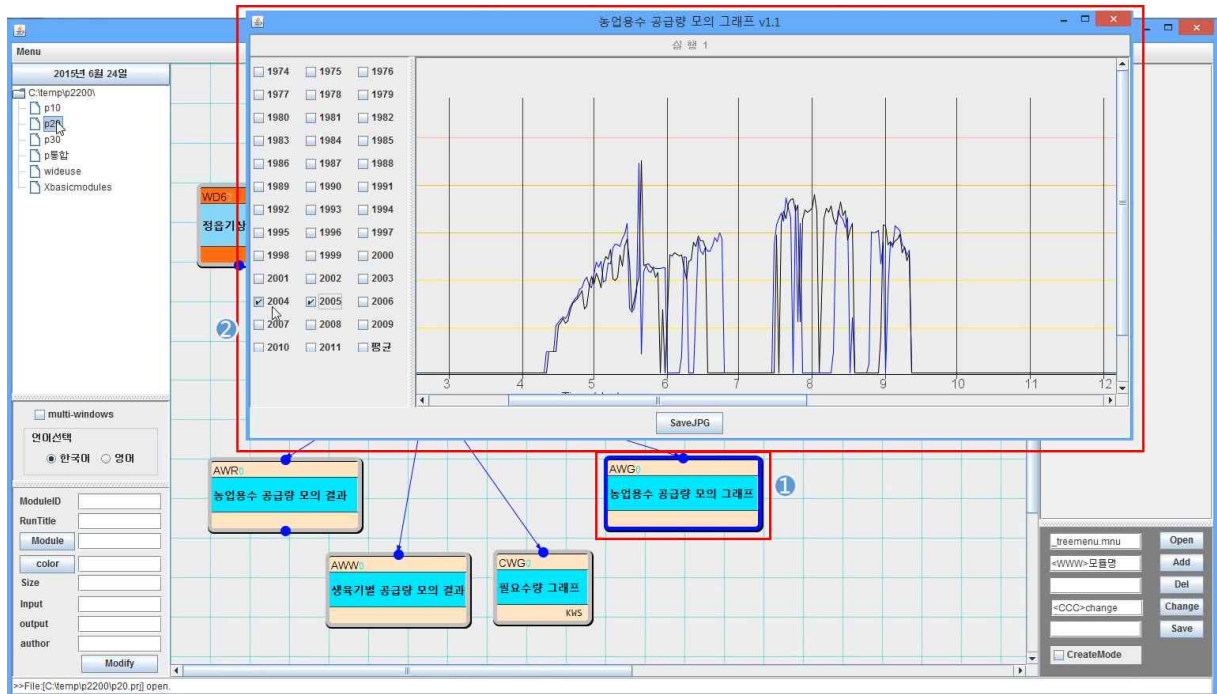


(그림 첨부 II-73) 생육기별 공급량 모의 결과



(그림 첨부 II-74) 필요수량 그래프

- 필요수량 그래프 부분은 모의된 관개면적의 필요수량을 그래프로 나타내는 부분으로서 5, 10, 20, 30년 평균 필요수량 그래프를 제공
- 농업용수 공급량 그래프 부분은 해당기간에 모의된 용수공급량을 그래프로 나타내는 부분으로서 왼쪽 날짜부분을 다중 선택함에 따라 그래프 상의 용수공급량이 다중으로 중첩되어 도식화 됨
- 필요수량 및 공급량 그래프는 이미지로 내보내기 가능



(그림 첨부 II-75) 농업용수 공급량 그래프

5.3 저수지 물수지 분석

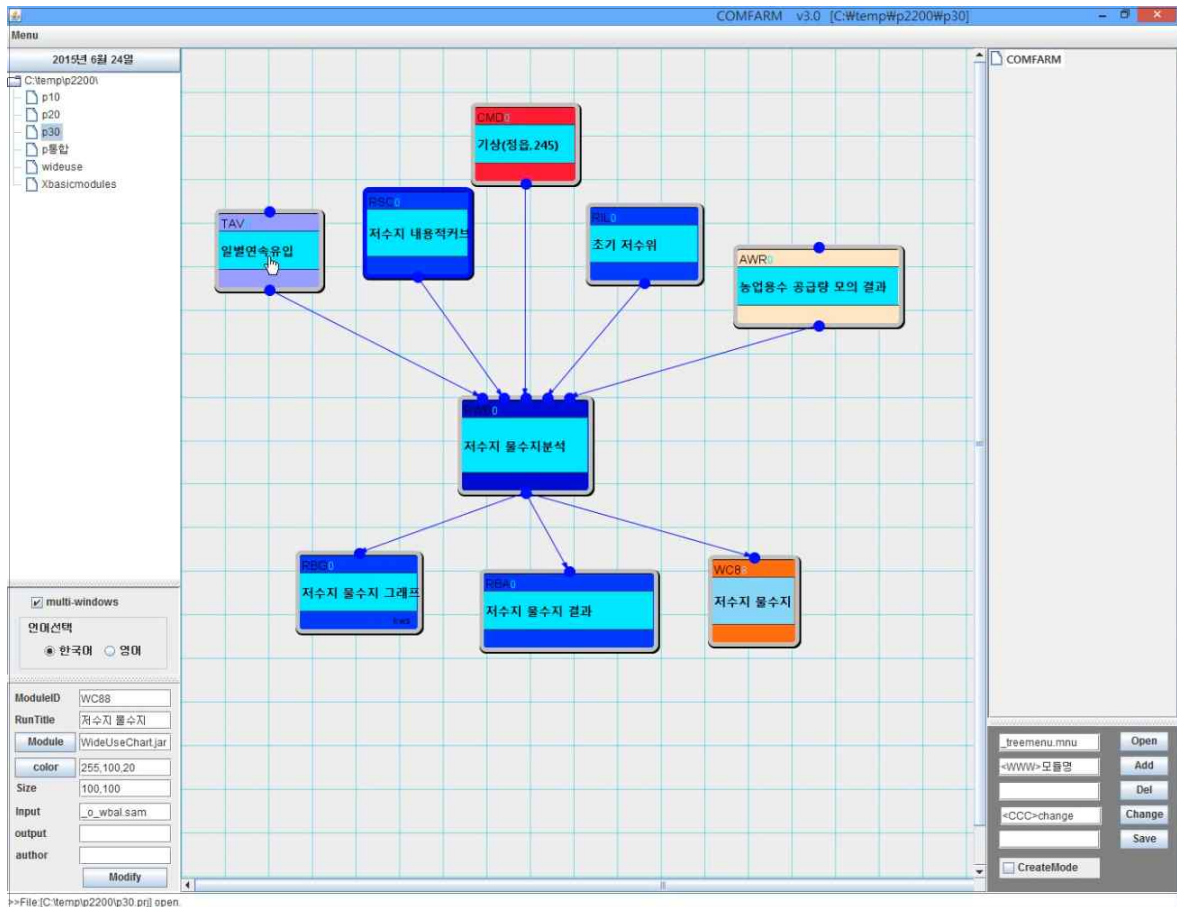
- 저수지 물수지 분석은 다음 (그림 첨부 II-76)과 같음.
- 메인 화면 오른쪽의 모듈 리스트를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 등록
- 메인 화면 왼쪽의 모듈 연결 메뉴를 이용하여 입출력 및 실행 모듈을 연결
- 모듈 등록 및 연결 등 모듈 관련 상세 내용은 chapter 4 참고

가. 입력자료

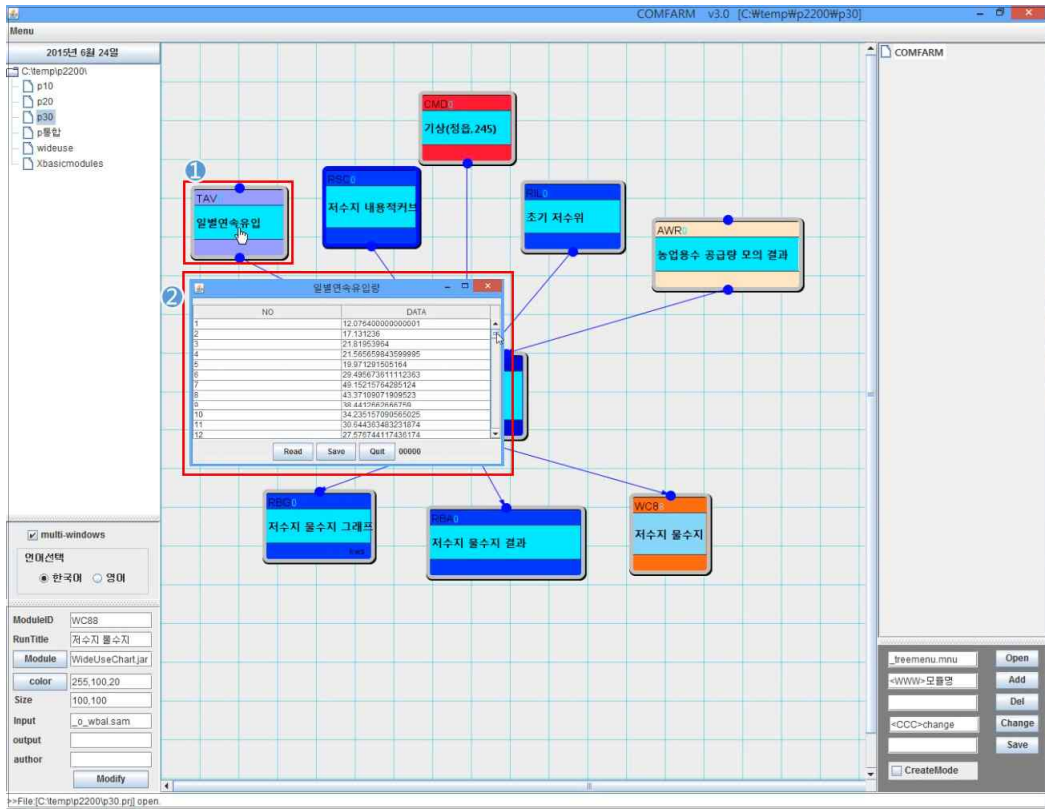
- 유역유출량 분석은 일별 연속유입, 저수지 내용적 곡선, 기상자료, 초기 저수위, 농업용수 공급량 모의결과 총 5개의 입력자료를 요구함.
- 저수지 내용적 곡선 부분에서는 저수지의 표고에 따른 저수지 면적자료를 입력하고 마지막에 만수위를 입력함 ((그림 첨부 II-77)).
- 기상자료 입력 부분에서는 일별 강우, 증발, 기온, 습도, 풍속, 일조시간 총

6개 기상자료를 입력함 ((그림 첨부 II-78)).

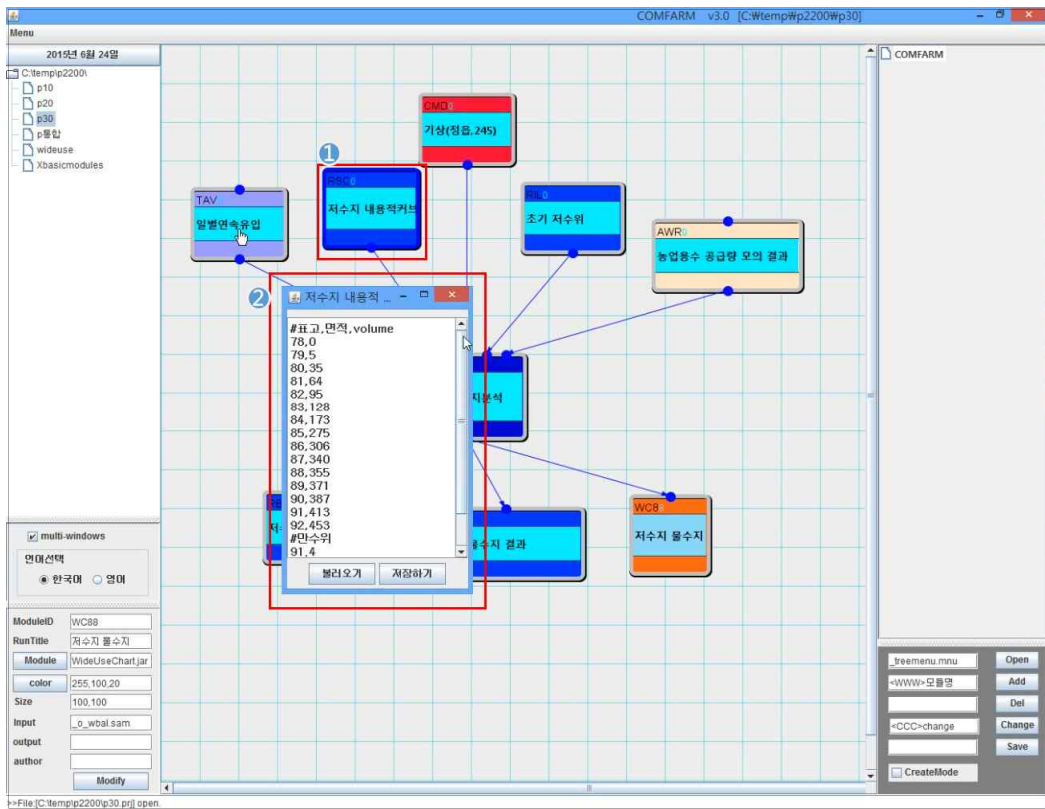
- 초기 저수위 부분에서는 저수지 초기 저수위와 그에 해당하는 저수면적을 입력함 ((그림 첨부 II-79)).
- 농업용수 공급량 모의결과 부분에서는 농업용수 공급량 분석을 통해 얻어진 일별 용수공급량 자료를 저수지 물수지 분석의 입력자료로 사용하게 됨 ((그림 첨부 II-80)).
- 또한 모든 입력자료는 불러오기 기능을 이용하여 txt, csv 등 다양한 형식의 파일 포맷의 입력자료를 저수지 물수지 분석 입력자료로 불러올 수 있음
- 입력자료 설정이 완료된 후 유역유출량 분석 모듈을 클릭하면 설정된 입력자료 리스트가 보여지고 실행완료 버튼을 클릭하면 출력될 모듈의 리스트가 표출됨 ((그림 첨부 II-81)).



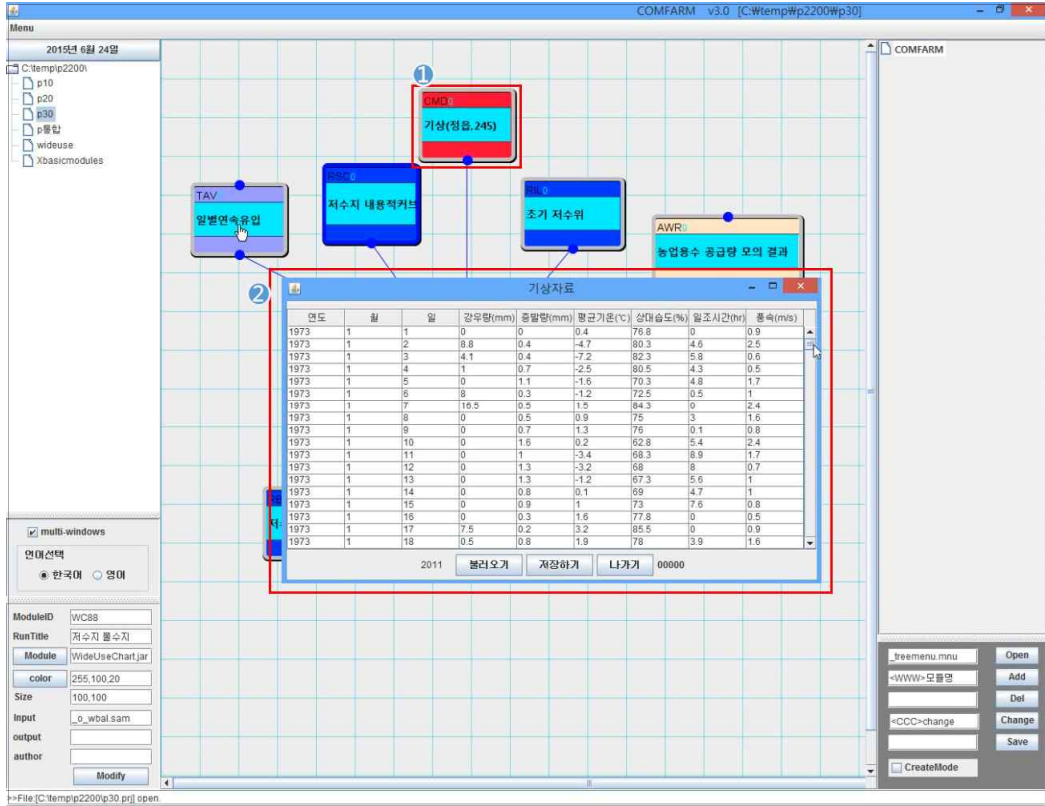
(그림 첨부 II-76) 저수지 물수지 분석



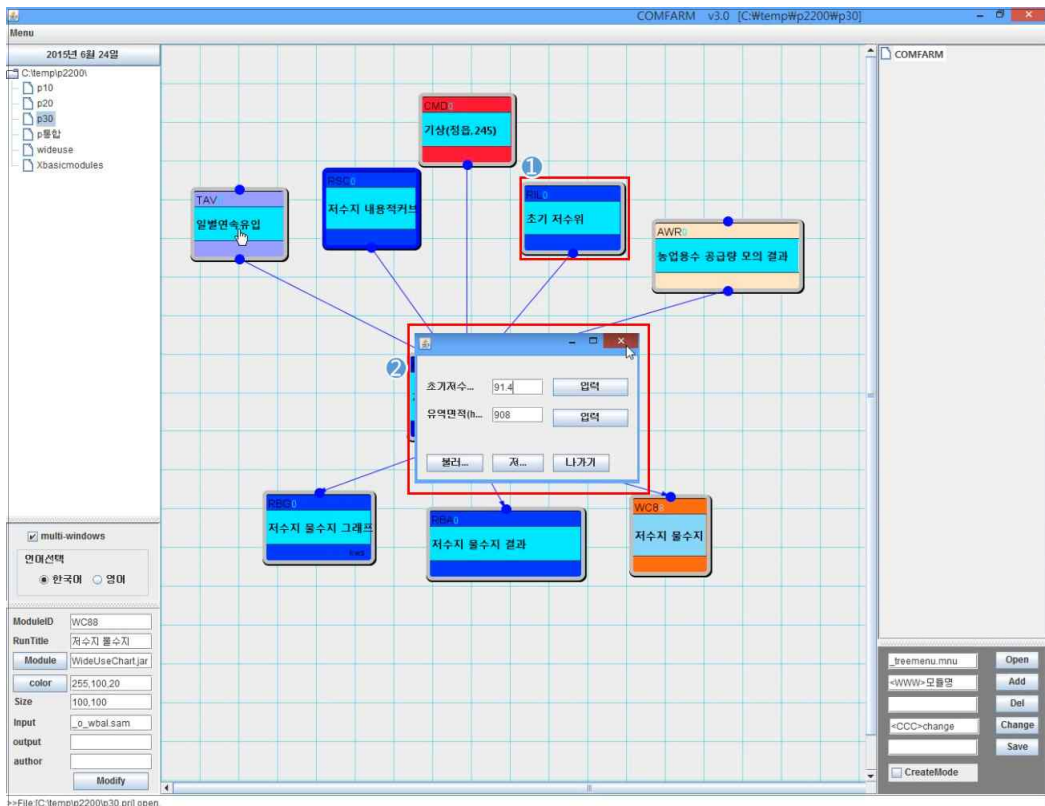
(그림 첨부 II-77) 일별 연속유입 입력자료



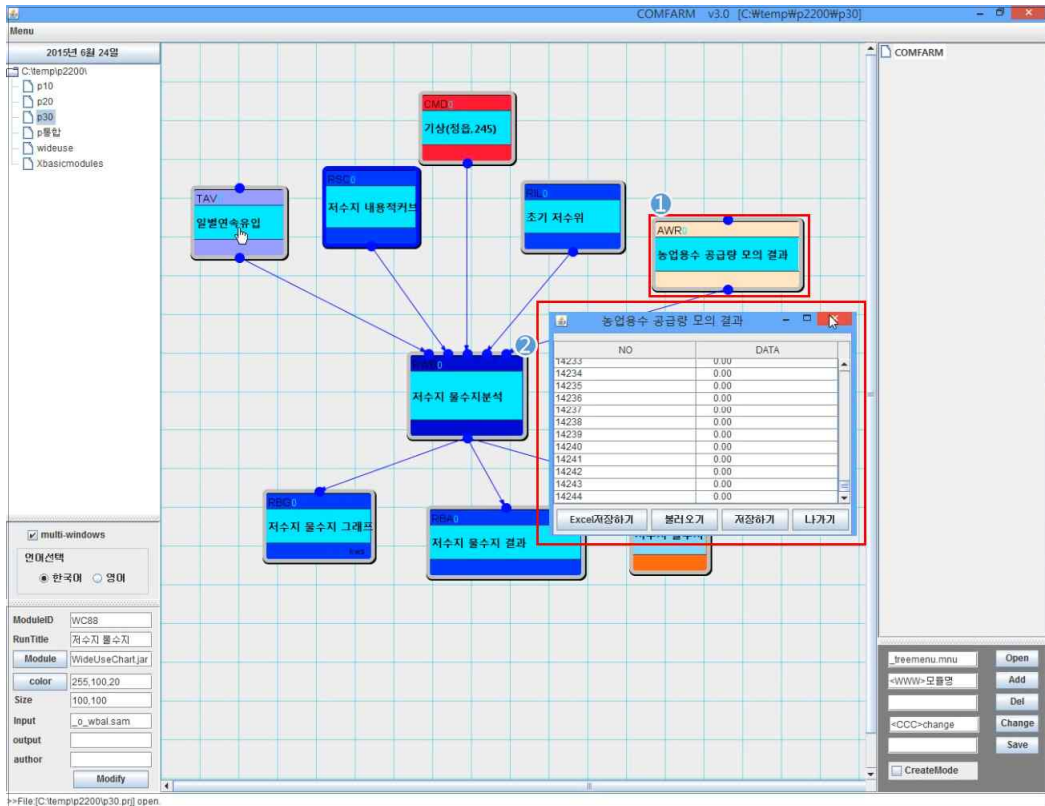
(그림 첨부 II-78) 저수지 내용적 곡선 입력자료



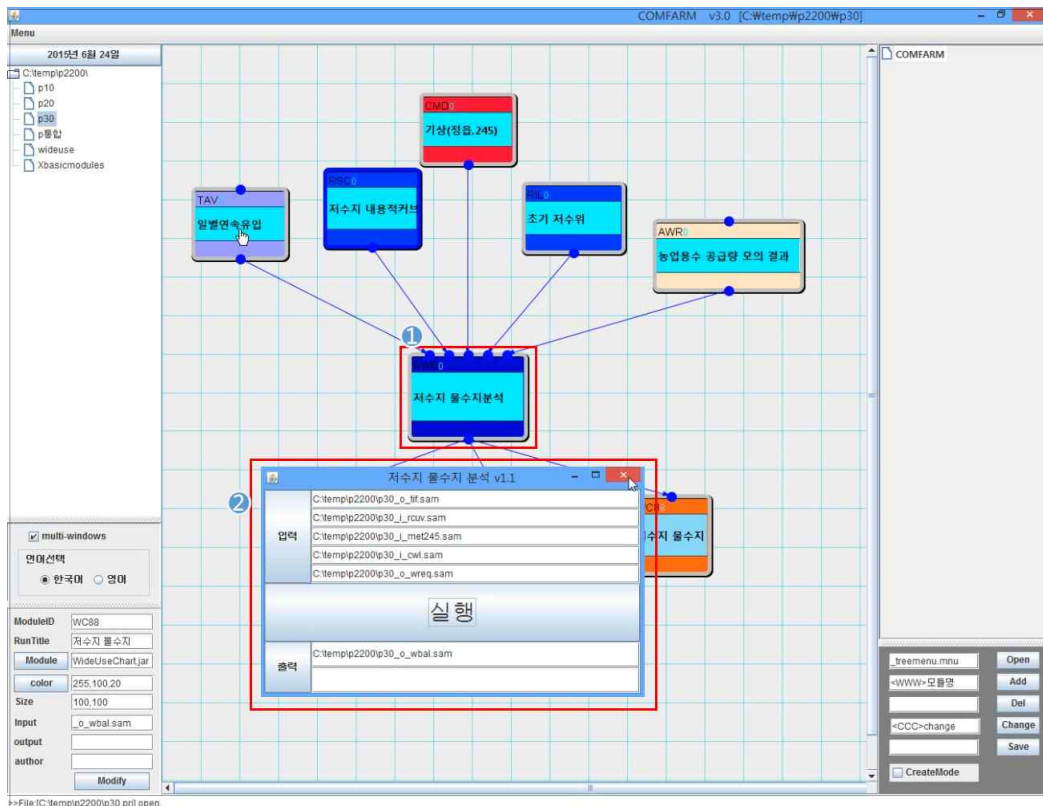
(그림 첨부 II-79) 기상자료 입력자료



(그림 첨부 II-80) 초기 저수위 입력자료



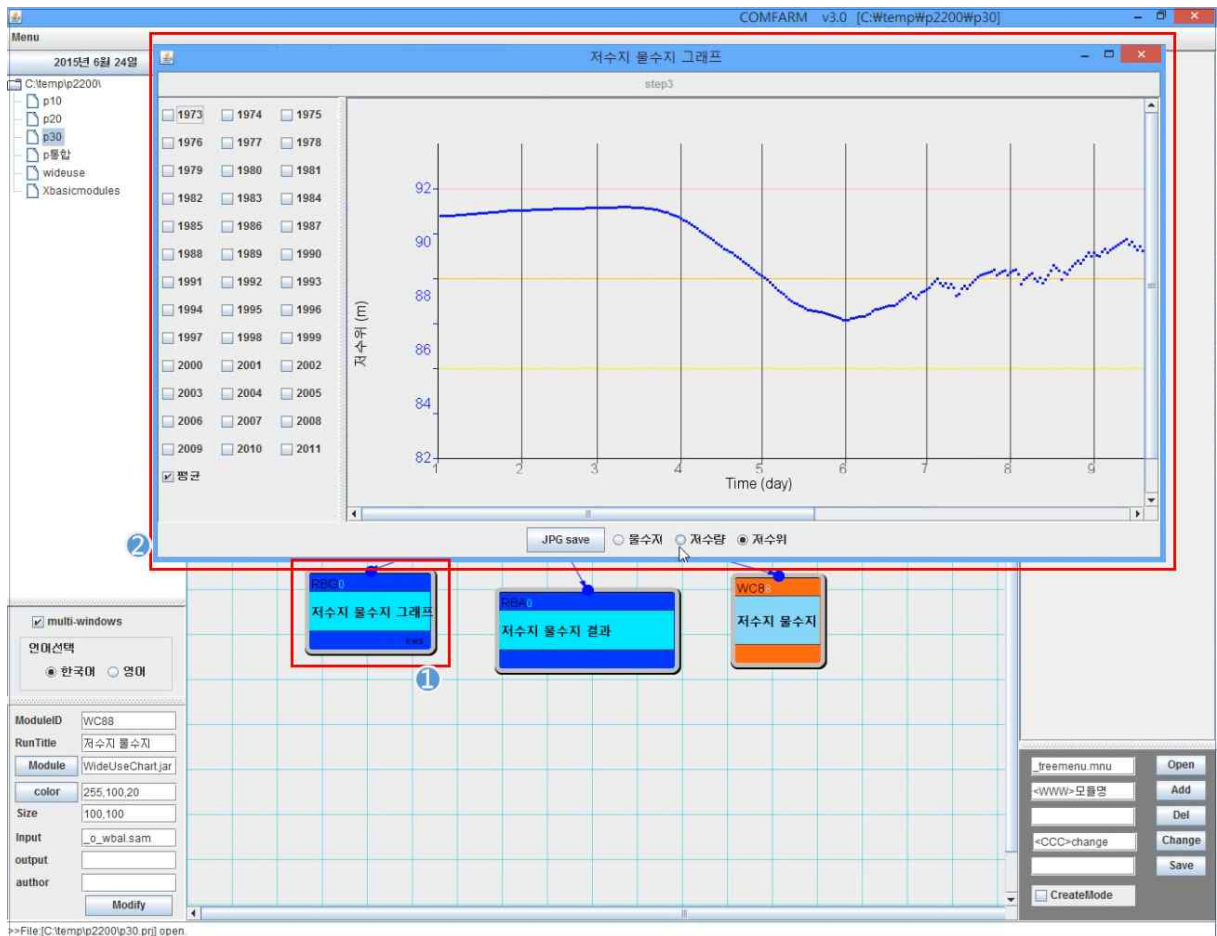
(그림 첨부 II-81) 농업용수 공급량 모의결과 입력자료



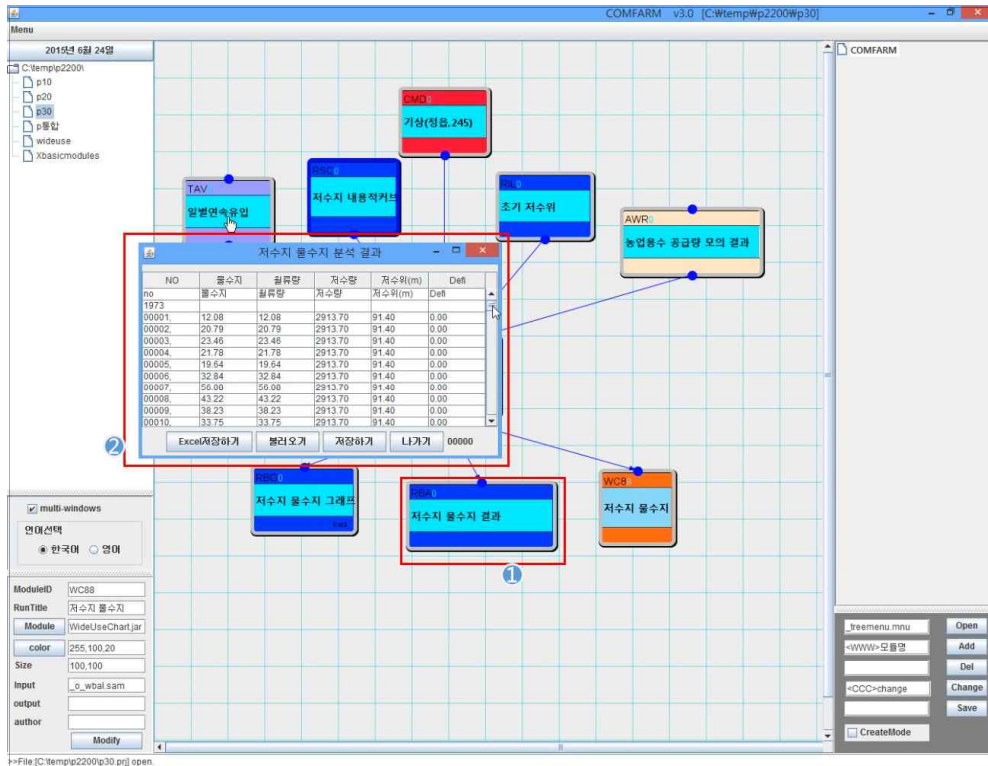
(그림 첨부 II-82) 저수지 물수지 분석 실행 모듈

나. 출력자료

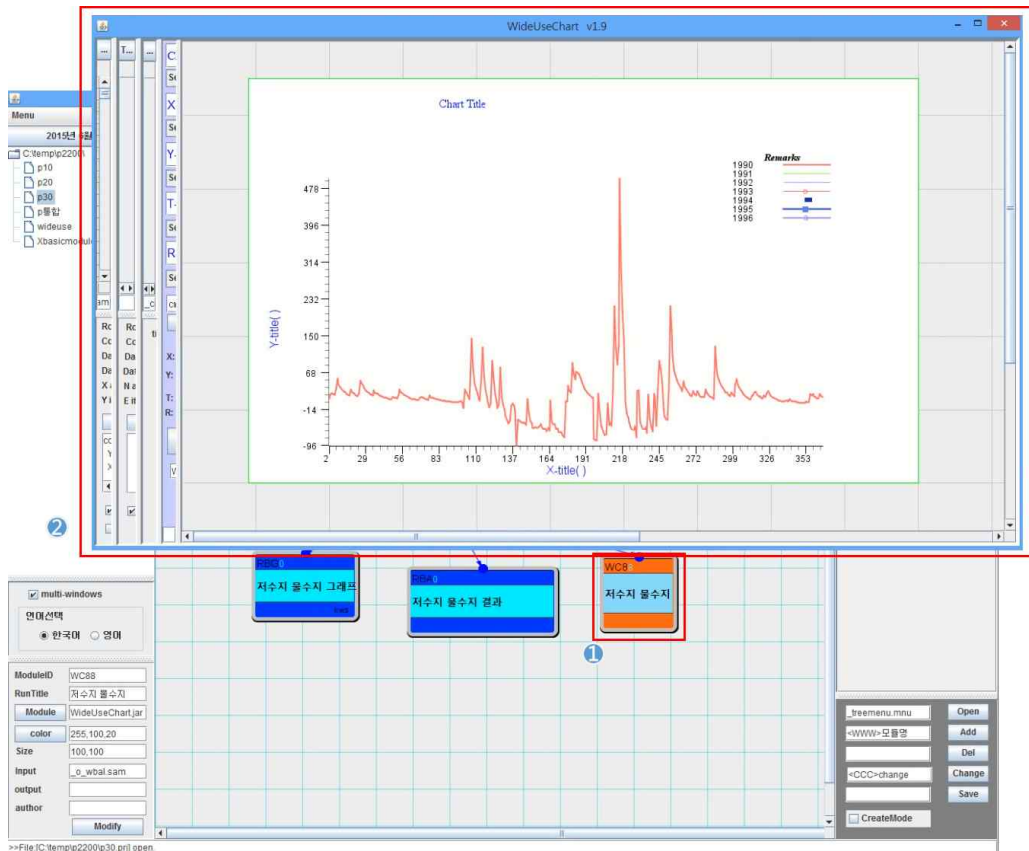
- 저수지 물수지 분석의 출력자료는 저수지 물수지 그래프, 저수지 물수지 결과 (테이블 및 범용차트)가 있음
- 저수지 물수지 그래프 부분에서는 해당기간에 모의된 저수지의 물수지, 저수량, 저수위 그래프를 나타내는데, 특정기간을 다중 선택하여 그래프를 중첩하여 각 기간의 저수지 물수지를 비교가능하게 하였음 ((그림 첨부 II-83)).
- 또한 해당 그래프는 이미지 파일로 내보내기 할 수 있도록 하였음
- 범용차트용 저수지 물수지 결과 부분은 저수지 유입량 결과를 범례 및 X, Y 최대최소값, 그래프 색상 등을 사용자가 원하는 형식으로 변경하여 보고서나 논문 등에 활용할 수 있도록 지원해 줌 ((그림 첨부 II-84)).
- 범용차트용 저수지 물수지 그래프에서 x-y축에 출력할 분석모듈의 output 파일을 X-Y datas 버튼을 클릭하여 불러와서 그래프 x-y축에 출력할 데이터의 시작, 끝 로우와 데이터 컬럼을 지정함으로써 선택적 표출 가능.



(그림 첨부 II-83) 저수지 물수지 그래프



(그림 첨부 II-84) 저수지 물수지 결과



(그림 첨부 II-85) 저수지 물수지 결과 (범용차트)

CHAPTER 6

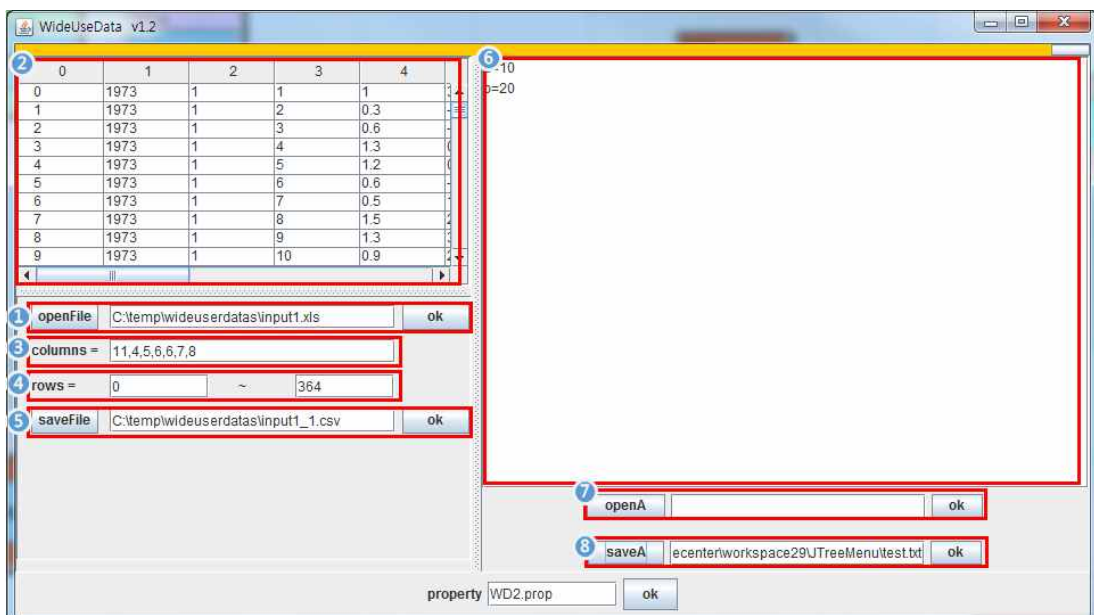
범용 모듈 사용법

6.1 범용모듈

- 범용 모듈들은 농촌용수 초기데이터, 프로젝트 전반에 적용되는 값 또는 농촌용수 분석요소 모듈에 적용되는 값을 사용자 관점에서 쉽게 데이터를 확인할 수 있는 정해져 있지 않은 모듈임.

가. 범용 입력 모듈

- 범용입력 모듈을 사용하는 방법은 다음과 같으며, (그림 첨부 II-86)과 같음.

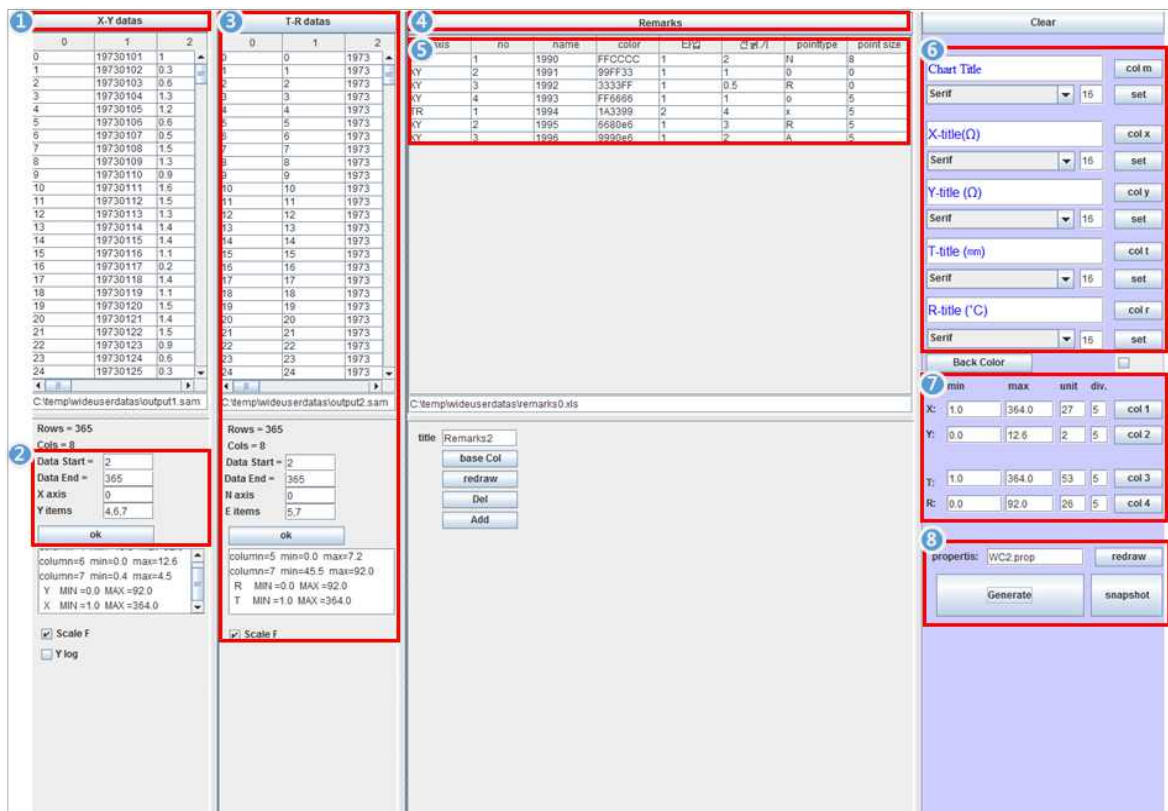


(그림 첨부 II-86) 범용입력모듈

- ① 분석모듈에서 사용할 농촌용수 초기데이터를 불러옴
- ② 불러온 초기데이터
- ③ 초기데이터에서 필요한 데이터 컬럼을 지정
- ④ 초기데이터에서 필요한 데이터 로우를 지정
- ⑤ 편집한 데이터를 저장할 위치를 지정해주고, 저장
- ⑥ 자유형식의 데이터를 입력할 수 있음.
- ⑦ 자유형식의 데이터를 불러올 수 있음.
- ⑧ 편집한 자유형식의 데이터를 저장할 위치를 지정해주고, 저장

나. 범용 출력 모듈

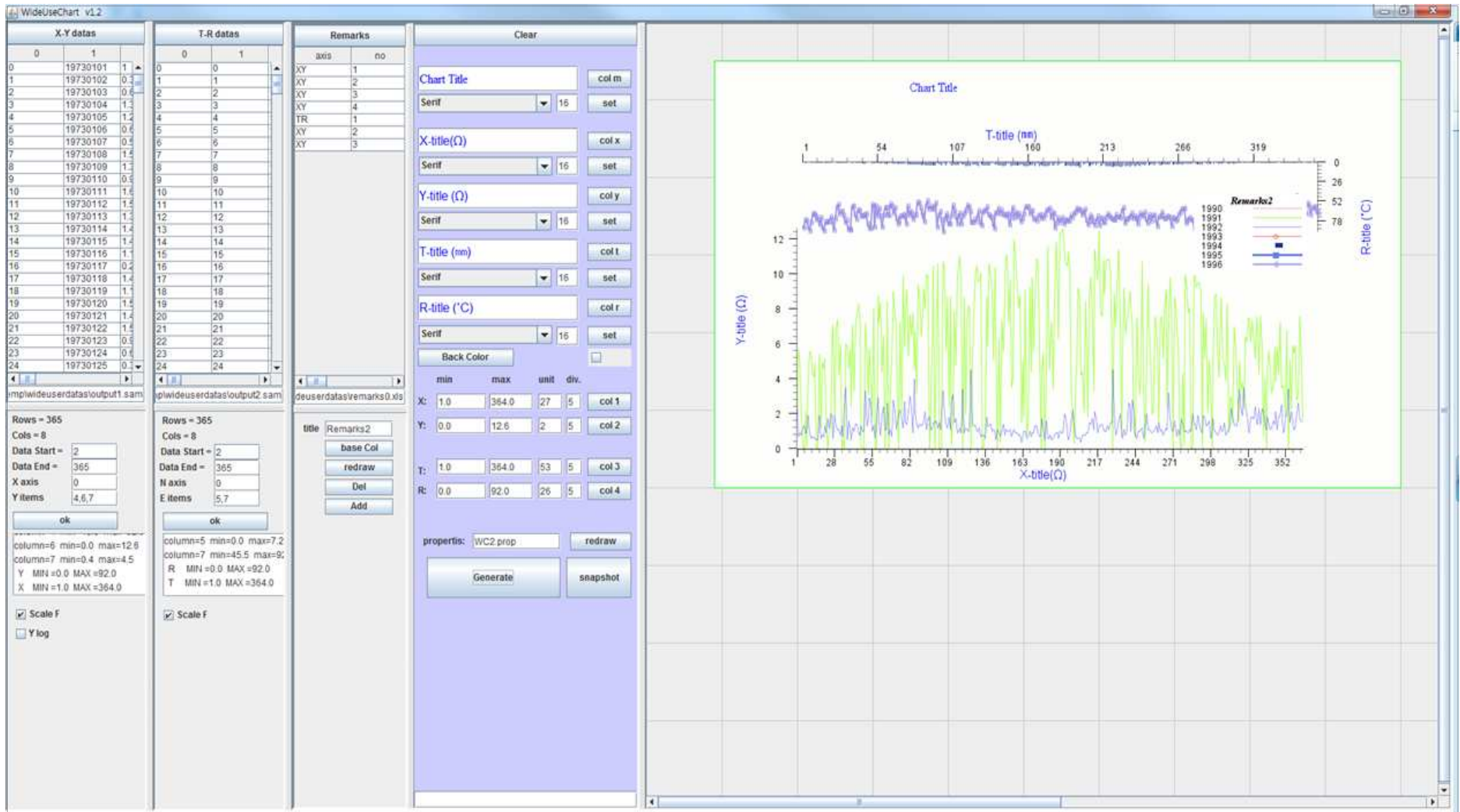
- 범용출력모듈 사용하는 방법은 다음과 같으며 (그림 첨부 II-87) 에 나타내었음.



(그림 첨부 II-87) 범용차트모듈 설정

- ① 그래프 x-y축에 출력할 분석모듈의 output파일을 X-Y datas 버튼을 클릭하여 불러옴.

- ② 그래프 x-y축에 출력할 데이터의 시작, 끝 로우와 데이터 컬럼을 지정해주고 ok버튼을 클릭
 - ③ t-r축 설정 부분으로 ①, ②의 내용과 같음.
 - ④ Remarks 버튼을 클릭하면 범례내용이 저장 된 파일을 불러옴.
 - ⑤ 범례내용이 저장 된 파일로 해당 셀을 더블 클릭하여 내용을 바꿀 수 있음.
 - 타입은 그래프의 모양을 나타내는 것으로서 1일 경우 꺾은선 그래프이고 2일 경우 막대그래프임.
 - pointtype은 그래프 선 상 포인트 모양을 나타내는 것으로서 N은 모양없음이고, R은 사각형, O는 원, a~z는 해당 문자 모양을 나타냄.
 - ⑥ X-Y, T-R축의 타이틀의 내용, 색, 폰트, 폰트사이즈를 수정할 수 있음.
 - ⑦ X-Y, T-R축의 최소값, 최대값, 간격, unit값을 수정할 수 있음.
 - ⑧ Generate버튼을 클릭하면 설정 값을 기반으로 그래프가 출력되고 snapshot 버튼을 클릭하면 루트 폴더에 그래프가 캡처 된 파일이 생성되고, 설정 값들이 propertis파일에 저장이 됨.
- (그림 첨부 II-88)은 범용차트 실행 화면임.



(그림 첨부 II-88) 범용차트모듈 실행화면

〈첨부 III〉 농촌용수 모형 사용자 설문조사

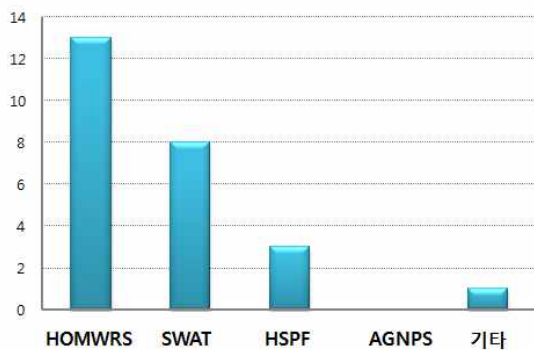
제 1 절 설문 방법

상기한 설문 설계를 바탕으로 설문 조사서를 작성하였다. 대학, 연구기관, 사업기관에서 농촌용수 관련 분야 전문가들을 대상으로 설문 조사표를 이메일로 송부하고 설문조사를 의뢰하였다. 총 30명을 대상으로 설문을 의뢰하였으며 이들 중 23명으로부터 설문 답변을 받아 응답율은 약 77%였다.

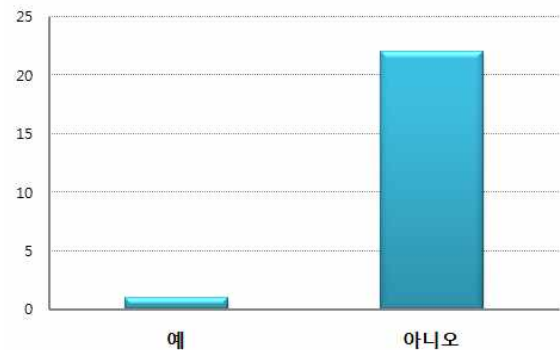
제 2 절 설문 결과

1. 농촌용수 해석 모형 현황 및 개발방향

현재 개발되어있는 모형 중 국내에서 농촌용수 해석에 가장 많이 사용되는 모형은 HOMWRS, SWAT, HSPF순으로 나타났으며, 현재 가용한 모형으로 농촌용수의 종합적 해석은 대다수가 충분하지 않다고 응답하였다. 또한 모형의 부족한 부분은 다양한 응답결과가 나타났고 수리 및 수문해석이 가장 부족한 부분으로 나타났다. (그림 첨부 III-1)의 세로축은 응답자수(명)를 의미한다.



(a) 가장 많이 사용되는 모형



(b) 모형의 농촌용수 해석 충분여부



(c) 모형의 부족한 부분

(그림 첨부 III-1) 농촌용수 해석 모형 현황

농촌용수 해석모형의 개발방향은 (그림 첨부 Ⅲ-2)와 같으며, 기존모형을 활용하고자 하는 의견이 신규모형을 개발하고자 하는 의견보다 약간 많았으며, 시스템 개발의 최종 이용자는 현장 실무자여야 한다는 의견이 가장 많은 것으로 나타났다. 시스템 구성요소와 의사결정 항목에 대해서는 다양한 의견이 나왔으며, 그중에서도 농촌용수 해석 시스템이 시스템 구성요소 중 가장 필요하고, 저수위 관리 및 수문조작에 대한 의사결정이 가장 유용하게 활용될 것으로 조사되었다.



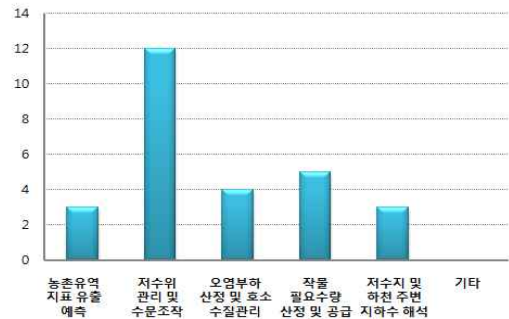
(a) 향후 모형 개발 방안



(b) 최종이용자



(c) 시스템 구성요소



(d) 종합해석 모형의 의사결정 항목

(그림 첨부Ⅲ-2) 농촌용수 해석 모형 개발방향

2. 농촌용수 해석 모형 개발 - 기존 모형 활용

농촌용수 종합해석을 위해 기존에 개발된 모형 중 농촌유역 해석에 가장 적합할 것으로 판단되는 모형에 대한 설문에서는 우선적으로 고려해야 할 사항과 모의시 필요한 부분에 대해 조사를 수행하였다. 또한 수문/수질 예측모형, 장기유출모형, 호소모형의 기존 모형 중 적합한 모형에 대한 조사를 수행하였다 (그림 첨부Ⅲ-3).

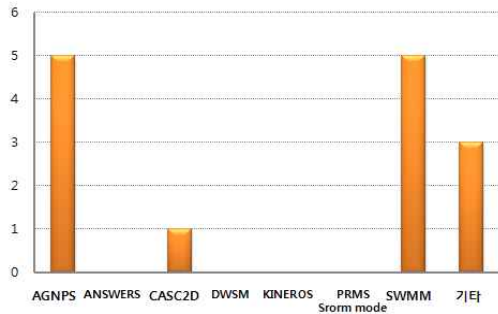


(a) 우선 고려사항

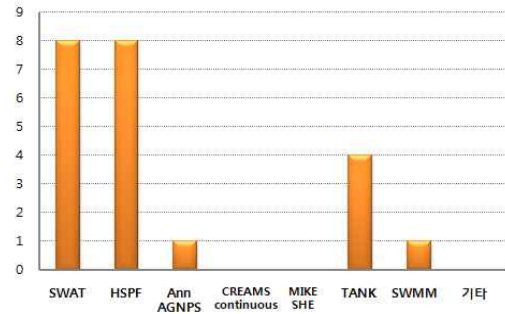


(b) 필요 모의부분

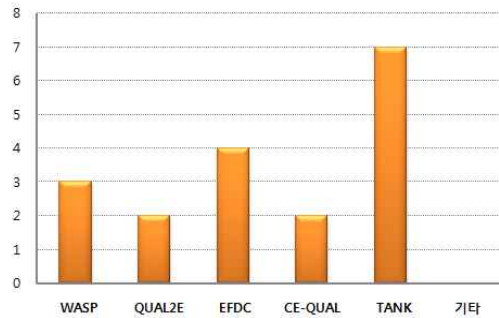
(그림 첨부Ⅲ-3) 기존 모형 활용



(c) 적합한 수문/수질 예측모형



(d) 적합한 장기유출모형



(e) 적합한 호소모형

(그림 첨부III-3) 기존 모형 활용(계속)

3. 농촌용수 해석 모형 개발 - 국내 신규 개발

다음으로 농촌용수 종합해석을 위해 국내 여건에 가장 잘 고려할 수 있도록 새로운 모형을 개발하고자 할 경우에 대한 설문을 수행하였다. 설문결과 모형사용의 편의성을 가장 우선으로 고려하여야 하고, 모형검증을 위한 Test bed로써 시험유역 선정 및 자료수집에 대부분 동의하였으며 시험유역 선정시 농촌용수 해석의 대표성을 가장 많이 고려하여야 할 것으로 조사되었다. 또한 모니터링시 필요한 자료는 고르게 분포되어 다양한 모니터링 자료가 필요한 것으로 나타났다 (그림 첨부III-4).

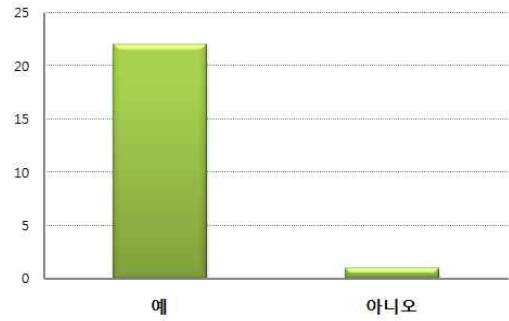
모형 개발시 시·공간적 규모에 대한 항목에서는 모의시간은 일별, 시간별 순으로 적정할 것으로 조사되었으며, 공간적 규모는 여러 소유역으로 구성된 중규모 유역이 적정할 것이라는 의견이 가장 많이 나타났다 (그림 첨부III-5).

다음으로 수문 요소에 대한 산정 모형중 가장 적절한 모형에 대해 증발산, 초과강우 산정, 침투량, 지표 유출 추적, 하도추적, 지하수 흐름 모의부분으로 나누어 설문조사를 수행하였다. 증발산의 경우 Penmann-Monteith, 초과강우 및 침투량의 경우 SCS Curve Number 방법, 지표유출 추적의 경우 SCS unit hydrograph: TR-55 방법이 가장 적합할 것으로 조사되었다. 또한 하도추적은 Kinematic wave equation, 지하수 흐름은 3-D groundwater flow equation이 가장 적합할 것으로 조사되었다 (그림 첨부III-6).

마지막으로 수질모의를 위해 수질 항목에 대한 필요모형과 유사(Sediment)모의시 적합한 모형에 대해 설문조사를 수행하였다. N이 가장 모형이 필요한 수질항목으로 나타났다으며, 유사(Sediment)모의시에는 Modified USLE가 가장 적합할 것으로 조사되었다 (그림 첨부III-7).

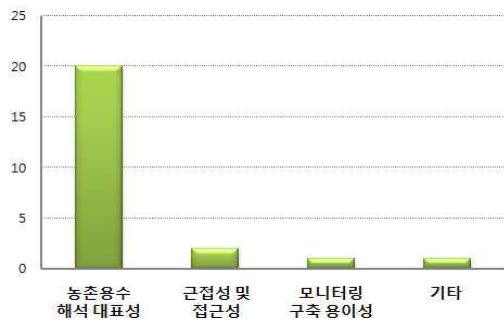


(a) 우선 고려사항

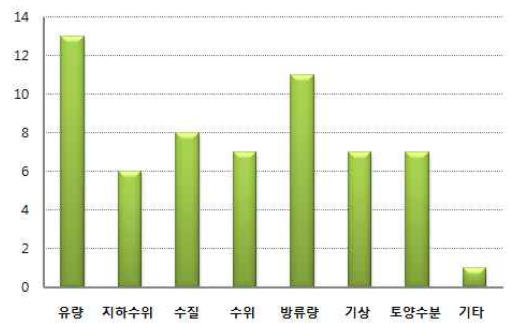


(b) 시험구역 선정 및 자료수집 필요여부

(그림 첨부III-4) 모형의 국내 신규 개발



(c) 시험구역 선정시 고려사항

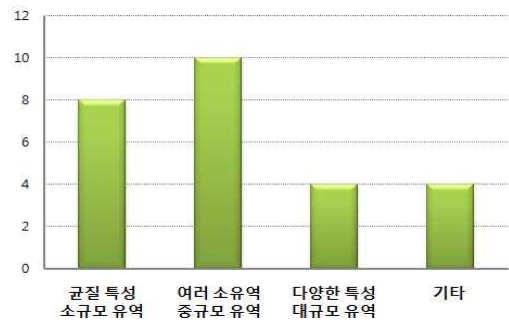


(d) 모니터링 필요자료

(그림 첨부III-4) 모형의 국내 신규 개발(계속)

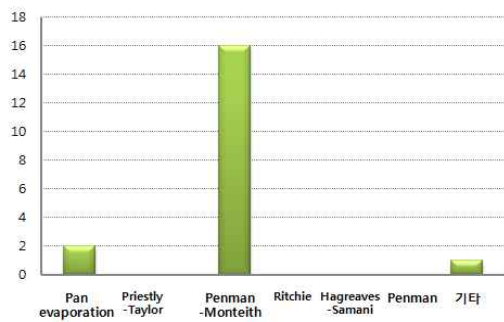


(a) 모의시간 간격

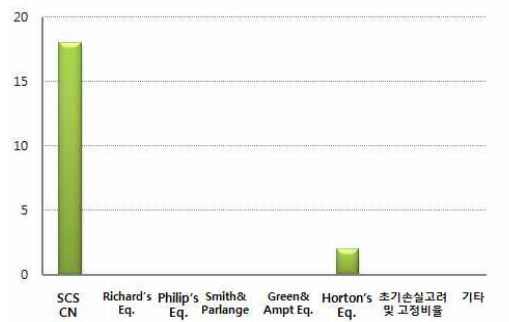


(b) 공간적 규모

(그림 첨부III-5) 개발모형의 시·공간적 규모

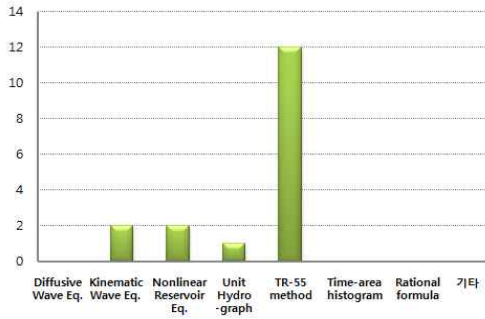


(a) 증발산

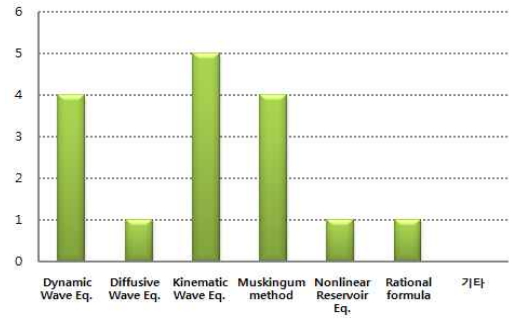


(b) 초과강우 및 침투량

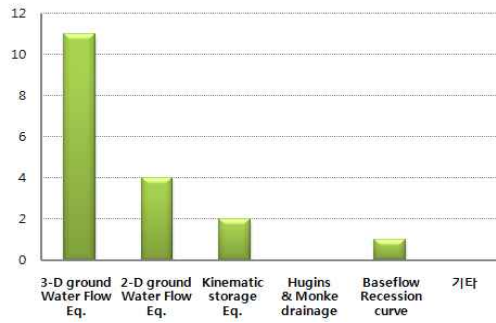
(그림 첨부III-6) 수문요소 산정 모형



(c) 지표유출추적

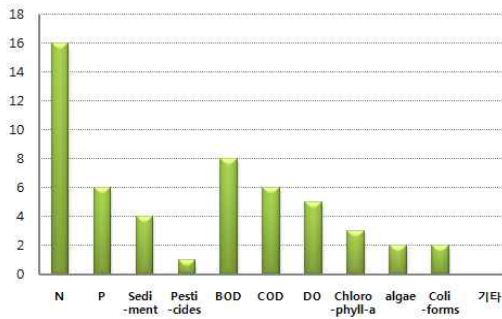


(d) 하도추적

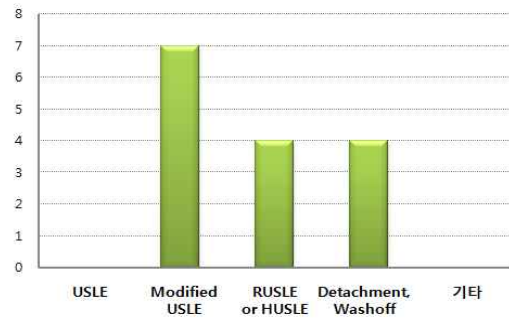


(e) 지하수 흐름

(그림 첨부III-6) 수문요소 산정 모형(계속)



(a) 모형 필요 수질항목



(b) 유사(Sediment)모의시 적합모형

(그림 첨부III-7) 수질 모형

<첨부 IV> 연구성과 증빙자료

제 1 절 지식재산권 출원

1. 농촌용수해석 모델링 방법 및 장치

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2014.06.05
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2014-0068639 (접수번호 1-1-2014-0532432-75)
출원인명칭 서울대학교산학협력단(1-2007-050924-2)
대리인성명 오세일(9-2010-000493-1)
발명자성명 강문성 송인홍 송정현 전상민 박지훈 김계웅 기우석 김진택
발명의명칭 농촌용수 해석 모델링 방법 및 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드)+접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정 신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허-실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허-실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

2. 농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2015.08.03
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2015-0109578 (접수번호 1-1-2015-0752291-62)
출원인명칭 서울대학교산학협력단(1-2007-050924-2)
대리인성명 오세일(9-2010-000493-1)
발명자성명 강문성 송인홍 박지훈 송정현 전상민 김계웅 류정훈
발명의명칭 농촌용수 해석을 위한 모형입력자료 제공 방법 및 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

제 2 절 논문 및 학술 발표 게재

1. 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발 (KCI, 게재)



Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 55, No. 3, pp. 63-73, May, 2013
DOI:http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2013.55.3.063

복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발

Surface Drainage Simulation Model for Irrigation Districts Composed of Paddy and Protected Cultivation

송정현* · 강문성** · 송인홍*** · 황순호* · 박지훈* · 안지현*

Song, Jung-Hun · Kang, Moon-Seong · Song, Inhong · Hwang, Soon-Ho · Park, Jihoon · Ahn, Ji-Hyun

ABSTRACT

The objectives of this study were to develop a hydrologic simulation model to estimate surface drainage for irrigation districts consisting of paddy and protected cultivation, and to evaluate the applicability of the developed model. The model consists of three sub-models; agricultural supply, paddy block drainage, and protected cultivation runoff. The model simulates daily total drainage as the sum of paddy field drainage, irrigation canal drainage, and protected cultivation runoff at the outlets of the irrigation districts. The agricultural supply sub-model was formulated considering crop water requirement for growing seasons and agricultural water management loss. Agricultural supply was calculated for use as input data for the paddy block sub-model. The paddy block drainage sub-model simulates paddy field drainage based on water balance, and irrigation canal drainage as a fraction of agricultural supply. Protected cultivation runoff is calculated based on NRCS (Natural Resources Conservation Service) curve number method. The Idong reservoir irrigation district was selected for surface drainage monitoring and model verification. The parameters of model were calibrated using a trial and error technique, and validated with the measured data from the study site. The model can be a useful tool to estimate surface drainage for irrigated districts consisting of paddy and protected cultivation.

Keywords: Irrigated districts; paddy; protected cultivation; drainage; agricultural supply

1. 서 론

관개지구는 논벼의 담수재배를 위해 수리시설물로부터 관개용수를 공급받는 지역으로 수리시설물, 논, 그리고 용배수로로 구성된다. 관개지구의 배수량은 유역의 물 수급 전망, 하천 유황의 예측, 농업비점오염 부하량 추정 등 유역 수자원 관리에 있어서 중요한 요소이다. 관개지구의 수문순환은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물고 높이 등의 인위적 요소에 영향을 받는다.

우리나라는 관개지구의 농업용수 공급량을 주로 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model) (Kim, 1998)을 적용하여 추정한다. 하지만 이 방법은 최적의 유지관리 및 물 관리를 가정하고 있기 때문에 실제 공급량과 차이가 발생하는 것으로

보고되고 있다 (Im et al., 2000; Lee et al., 2006). 이를 보완하여 실제 관개지구의 영농방식을 현장 조사하여 기존의 필요수량 산정방식에서 영농 시기를 달리하여 공급량을 모의하는 연구가 Ju et al. (2006)에 의해 수행된 바 있다.

논 지표배수량은 포장단위에서 물수지 요소를 분석하여 추정하는 연구가 주로 이루어져 왔다. Kim et al. (2007)은 논벼의 재배방식별 물 관리 형태를 고려하여 홍수기 논외의 물수지를 분석하는 모형을 개발하였으며, 현장 측정자료를 이용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 하지만 농업용수 공급량 중 관개되지 않고 하천으로 흘러들어가는 용수로 배수량 (irrigation canal drainage)을 고려하여 광역단위 논외의 배수량을 추정하는 연구는 미흡한 실정이다.

한편, 시설재배지의 면적은 1991년 62,622 ha에서 2011년 93,416 ha로 약 78 % 증가하였으며 (MAP, 1996; MIFAPP, 2012), 용수원과 수리시설이 완비된 논외 시설재배지로 전용되는 것으로 보고되고 있다 (Lee et al., 1998). 시설재배지는 불투수면으로 강우가 배수로 또는 하천으로 일시에 유입됨에 따라 하천수위 급상승에 기여한다 (Kim, 2009), 시설재배지의 유출량을 관측하거나 모의하는 연구는 미흡한 상태이며, Kim (2009)에 의해 NRCS(Natural Resources Conservation Service) 유출곡선법 (USDA NRCS, 2004)을 이용하여 유출량을 추정하는 연

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경·지역시스템공학부

** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부,

농업생명과학연구원 전문연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: msikang@amu.ac.kr

2013년 3월 7일 투고

2013년 4월 26일 심사완료

2013년 5월 3일 게재확정

나타났고, 배수량 1,890.8 mm, 송수 손실 수량 51.6 mm, 논 침투량 132.0 mm, 증발산량 570.3 mm로 총 2,644.6 mm가 관개지구에서 빠져나가는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 관개지구의 배수량에 대한 이해를 넓히며, 배수량 추정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Chung, H. W., S. J. Kim, J. S. Kim, J. K. Noh, K. W. Park, J. G. Son, K. H. Lee, N. H. Lee, S. O. Chung, J. D. Choi, and J. Y. Choi, 2006. Irrigation and drainage engineering. Paju, Dongmyungsa (in Korean).
2. David, R. L., and M. J. Gregory, 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1): 233-241.
3. Im, S. J., 2000. Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
4. Im, S. J., M. G. Kang, S. W. Park, and C. E. Park, 2000. Surveying water supply from irrigation reservoirs in Han River basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 42(6): 37-44 (in Korean).
5. Im, S. J., S. W. Park, and H. J. Kim, 2000. Methodology for estimating agricultural water supply in the Han River basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 33(6): 765-774 (in Korean).
6. Ju, W. J., J. T. Kim, K. W. Park, and Y. J. Lee, 2006. Development of system for estimating water demand considering variation on farming conditions in paddy field. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 13(3): 82-90 (in-Korean).
7. Kang, M. S., S. W. Park, and J. A. Chun, 2003. Estimating pollutant loading using remote sensing and GIS-AGNPS model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 45(1): 102-114 (in Korean).
8. KARICO, 2005. A study on water supply methods considering variation of farming conditions in paddy field, 160-163. Uiwang, Gyeonggi: Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (in Korean).
9. Kim, H. K., 2009. Modeling hydrologic and water quality effects of impervious surfaces in farm and urban watersheds. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
10. Kim, H. Y., 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
11. Kim, J. S., S. Y. Oh, K. Y. Oh, and J. W. Cho, 2005. Delivery management water requirement for irrigation ditches associated with large-sized paddy plots in Korea. *Paddy Water Environment* 3: 57-62.
12. Kim, S. J., G. A. Park, and H. J. Kwon, 2007. Evaluation of paddy water dynamics during flood period in South Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(5): 269-276.
13. Lee, N. H., 1988. Simulating daily operation of water management systems of irrigation districts. Ph.D. diss., Seoul, Seoul National University (in Korean).
14. Lee, N. H., H. C. Hwang, S. W. Nam, S. G. Hong, and W. J. Jeon, 1998. A study on the utilization of irrigations systems for greenhouse farming. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 40(6): 37-45 (in Korean).
15. Lee, Y. J., S. J. Kim, P. S. Kim, W. J. Joo and Y. S. Yang, 2006. Study on the effective calculation method of irrigation water in a paddy fields area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 48(3): 11-20 (in Korean).
16. Lee, Y. J., P. S. Kim, S. J. Kim, Y. K. Jee and W. J. Joo, 2008. Estimation of water loss in irrigation canals through field measurement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering* 50(1): 13-21 (in Korean).
17. MAF, 1998. Design of farming scale improvement project, Gwacheon, Gyeonggi: Ministry of Agricultural and Forestry (in Korean).
18. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF), 2012. Food, agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook, Gwacheon, Korea (in Korean).
19. Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), 1996. Statistical yearbook of agriculture forestry and fisheries, Gwacheon, Korea (in Korean).
20. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow

2. 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발 (KCI, 게재)

Journal of the Korean Society of Rural Planning
vol. 20, no. 2, 2014 (103-114)

<http://dx.doi.org/10.7851/ksrp.2014.20.2.103>

농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발

전상민 · 강문성^{*} · 송인홍^{**} · 송정현 · 박지훈 · 기우석^{***}

서울대학교 생태조경·지역시스템공학부

^{*}서울대학교 조경·지역시스템공학부, 서울대학교 농업생명과학연구원

^{**}서울대학교 농업생명과학연구원 · ^{***}주식회사 부린

Development of agricultural reservoir water supply simulation system

Jun, Sang Min · Kang, Moon Seong^{*} · Song, Inhong^{**} · Song, Jung-Hun · Park, Jihoon · Kee, Woosuk^{***}

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University

^{}Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Research Institute for Agricultural and Life Sciences, Seoul National University*

*^{**}Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University*

*^{***}Burin Inc.*

ABSTRACT : The objective of this study was to develop agricultural reservoir water supply simulation system to assess water cycle of agricultural water district. Developed system was named as ARWS (Agricultural Reservoir Water supply simulation System). ARWS consists of platform and independent modules. In ARWS, reservoir inflow was calculated using Tank model, and agricultural water supply was calculated considering current farming period and mid-summer drainage. ARWS was applied to simulate water level of Gopung and Tapjung reservoir in 2011 - 2012. The results were compared to simulation results of HOMRWS and observed data. Average R^2 , EI, RMSE of ARWS were 0.76, 0.46, 1.78 (m), average R^2 , EI, RMSE of HOMRWS were 0.88, -0.14, 2.37 (m) respectively. Considering statistical variances, water level simulation results of ARWS were more similar to observed data than HOMRWS. ARWS can be useful to estimate reservoir water supply and assess hydrological processes of agricultural water district.

Key words : Agricultural Reservoir, Agricultural Water District, ARWS, Water Supply

1. 서 론

우리나라에는 현재 약 18,000여개의 농업용 저수지가 전국에 산재해 있으며, 농업용수 공급의 대부분을 담당하고 있다. 대부분의 농업용 저수지는 농업용수 공급을 목적으로 건설되었으나, 최근 정부는 기후변화에 따른 가뭄 및 홍수 발생에 대응하고, 노후화된 저수지를 보수하기 위해 농업용 저수지 뚝 높이기 사업을 실시하였다. 이에 따라 농업용 저수지의 역할은 농업용수 공급과 더불어 하천유지용수 공급, 홍수 방어 등으로 확장되었다.

농촌에서 수자원과 관련하여 문제가 되고 있는 가뭄과 홍수, 비점오염원에 의한 하천 수질 악화 및 조류 발생 등에 대한 대책을 마련하기 위해서는 농촌 유역의 물 순환에 대한 정확한 해석이 선행되어야 한다. 농촌 유역의 물 순환 해석을 위해서는 농업용 저수지 운영 모의가 반드시 이루어져야 하며, 농업용 저수지 역할의 확장에 따른 용수공급 패턴의 변화 또한 고려되어야 한다.

우리나라에서는 많은 연구자들이 농촌 유역의 물 순환 해석을 위하여 다양한 수문, 수리, 수질 모형이 적용하여 왔다. SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발된 모형으로 복합토지이용상태 및 토양 특성을 갖는 미계측 유역에서의 장기간에 걸친 오염총량을 추정하고, 최적관리기법에 따른 관리대안을 제시하는 연속적 분포형 매개변수 모형이

Corresponding author : Kang, Moon Seong
Tel. : 02-880-4582
E-mail : mskang@smu.ac.kr

vol. 20, no. 2, 2014 103

잘 모의하는 것으로 나타났으며, 효율지수의 경우 HOMWRS에서 -0.85, ARWS에서 0.60으로 ARWS가 실측 수위를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. RMSE의 경우 HOMWRS에서 1.08 m, ARWS에서 0.50 m로 실측 수위와 모의 수위의 편차는 ARWS에서 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 결정계수와 효율 지수가 HOMWRS에서 0.90과 0.51, ARWS에서 0.89과 0.79로 나타나 ARWS가 실측 수위를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났으며, RMSE는 HOMWRS에서 1.28 m, ARWS에서 0.84 m로 실측 수위와 모의 수위와의 편차 또한 ARWS에서 작게 모의되는 것으로 나타났다. 통계적 변량들을 분석한 결과, 탭정저수지에서 또한 고풍저수지와 마찬가지로 ARWS가 HOMWRS에 비해 실측 수위를 잘 모의하였다고 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템 (ARWS)을 개발하였다. ARWS는 모듈기반의 플랫폼으로 구성되어 사용자가 자유롭게 연구대상 유역을 구현할 수 있으며, 등록된 모듈 외에도 추가적인 모듈을 개발하여 등록할 수 있다. ARWS 시스템의 개발언어는 자바 언어를 이용하였으며, 개발환경은 이클립스 (Eclipse) 통합개발환경 (IDE, Integrated Development Environment)를 이용하였다.

모듈은 기능에 따라 크게 저수지 유입량 모듈, 농업용수 공급량 모듈, 저수지 물수지 분석모듈로 구분되며 총 21개로 이루어졌다. 또한, 유형에 따라 입력자료 생성 모듈, 계산 모듈, 데이터 출력 모듈로 구분된다. 계산 모듈은 입력 자료들을 받아서 계산하고 출력파일들을 생성하고 계산하는 모듈을 말하며 입력 데이터와 출력 데이터가 존재한다. 입력자료 생성 모듈의 경우는 입력 자료는 없으며 출력파일만 존재하는 모듈을 의미한다. 데이터 출력 모듈은 계산 모듈에서 생성된 출력파일을 받아들여 출력물을 보여주거나 데이터를 표, 그래프 등의 방법으로

출력하는 모듈을 나타낸다.

ARWS를 고풍저수지와 탭정저수지에 적용하여 농업용 저수지 운영을 모의하였으며, 저수지 수위 모의 결과를 실측 수위 및 HOMWRS에 의한 모의 결과와 비교 분석하였다. 수위 그래프 및 결정계수, 효율지수, 평균제곱근오차 등의 통계적 변량을 이용하여 비교한 결과, ARWS는 HOMWRS에 비해 비교적 실측 수위와 유사하게 저수지 수위를 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발한 ARWS는 향후 농촌유역의 물순환 해석에 적용이 용이할 것으로 기대된다. 또한, 모의요소들이 각각의 독립된 모듈로 개발되어 모듈 구성에 따라 사용자에게 다양한 환경을 제공하고 신규 모듈을 추가를 통한 확장이 가능해 다양한 현장에서 이용이 가능할 것으로 기대된다. 하지만 향후 ARWS의 현장 활용성을 높이기 위해서는 수질 모듈의 추가, 홍수 유출 모의 모듈 추가, 하천유지용수 방류 기준의 적용 등의 개선이 뒤따라야 하며, 이를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. An, G. H., Yum, K. T., Ban, Y. J., and Byun, C. Y., 2009, Current status and future directions of reservoir mathematical and water quality models in domestic and foreign countries: focusing on 3-D models, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 42 (8), pp. 83-92.
2. An, J. H., 2013, Development of regression equations for the parameter estimation of tank model based on basin slope, M.S. diss., Seoul, Seoul National University.

Table 6. Comparison of statistical variances (Tapjung)

System	2011			2012		
	R ²	EI	RMSE(m)	R ²	EI	RMSE(m)
HOMWRS	0.77	-0.85	1.08	0.90	0.51	1.28
ARWS	0.81	0.60	0.50	0.89	0.79	0.84

*R²: Coefficient of determination, EI: Nash-Sutcliffe Efficiency Index, RMSE: Root Mean Square Error

*HOMWRS: Hydrological Operation Model for Water Resources System

*ARWS: Agricultural Reservoir Water supply simulation System

3. 유역 유출량 추정을 위한 Tank 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가 (KCI, 게재)



유역 유출량 추정을 위한 TANK 모형의 매개변수 최적화에 따른 적용성 평가

Evaluation of the Tank Model Optimized Parameter for Watershed Modeling

김계웅* · 송정현* · 안지현*** · 박지훈* · 전상민* · 송인홍*** · 강문성***†

Kim, KyeUng · Song, JungHun · Ahn, Jihyun · Park, Jihoon · Jun, SangMin · Song, Inhong · Kang, MoonSeong

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate of the Tank model in simulating runoff discharge from rural watershed in comparison to the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. The model parameters of SWAT was calibrated by the shuffled complex evolution-university Arizona (SCE-UA) method while Tank model was calibrated by genetic algorithm (GA) and validated. Four dam watersheds were selected as the study areas. Hydrological data of the Water Management Information System (WAMIS) and geological data were used as an input data for the model simulation. Runoff data were used for the model calibration and validation. The determination coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) were used to evaluate the model performances. The result indicated that both SWAT model and Tank model simulated runoff reasonably during calibration and validation period. For annual runoff, the Tank model tended to overestimate, especially for small runoff (< 0.2 mm) whereas SWAT model underestimate runoff as compared to observed data. The statistics indicated that the Tank model simulated runoff more accurately than the SWAT model. Therefore the Tank model could be a good tool for runoff simulation considering its ease of use.

Keywords: TANK; SWAT; Optimization; Runoff

1. 서 론

유역 유출량의 정확한 추정은 유역관리의 중요한 요소이다. 가장 정확하게 유출량을 결정하는 방법은 직접 유출량을 측정하는 것이고, 우리나라는 지속적인 투자를 통하여 세계적인 수준의 수문관측 시스템을 갖추게 되었다. 그러나 모든 유역에 대하여 고비용의 수문관측시스템을 구축하는 것에는 어려움이 있으며 관측된 수문자료 또한 축적된 정도가 부족하고 실측자료가 일부 존재하는 등 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있어 이를 이용하는 것에 어려움이 존재한다 (Im et al., 2007; Choi et al., 2012). 부족한 유출량 자료를 모의하는 방법으로는 경험식에 의한 방법, 비유량법 등 여러 가지가 있으나 강우-유출 모형을 이용하여 모의하는 것이 일반적이다 (Shin et al., 2007).

국내의 유역 유출량 추정에는 Tank, SWAT (Soil and Water Assessment Tool), SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model), HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) 등 다양한 모형이 사용되고 있으며, 이 중 Tank 모형과 SWAT 모형이 널리 이용되고 있다 (Sung et al., 2008; Kim et al., 2009; Kim and Kim, 2012; Kang et al., 2013). 최근 컴퓨터 기술과 지리정보시스템의 발달로 물리적 매개변수 기반 분포형 수문모형의 이용이 증가하고 있으며 준분포형 모형인 SWAT 모형이 널리 이용되고 있는 추세이다 (Kang et al., 2006; Kim et al., 2009; Lee et al., 2011; Kim and Kim, 2012; Choi, 2013).

SWAT 모형은 물리적 매개변수 기반의 유역 규모 수문모형으로 DEM, 토지이용, 토양 등의 공간 분포형 입력 자료를 이용하여 유역 내 매개변수를 산정하고 유출량 및 수질을 모의할 수 있다. 또한, 유역의 물리적 특성에 의해 매개변수를 산정하기 때문에 특별한 보정과정 없이 미계측 유역에 적용가능하며 미래의 유역특성변화 또한 고려할 수 있는 장점이 있다 (Im et al., 2007; Kim and Kim, 2012). 그러나 SWAT 모형은 미국에서 개발되어 우리나라의 환경조건과 상이한 조건에서 개발된 모형으로 국내 유역특성을 반영하는 것에 한계가 있으며 보다 신뢰성 있는 모의를 위해서는 추가적으로 매개변수의 보정과정이 요구된다. 또한 많은 입력 자료와 매개변수는 모의 및 보정과정에 있어서 시간이

* 서울대학교 농업생명과학대학 생태조경-지역시스템공학부
** 서울대학교 농업생명과학대학 조경-지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸무연구원
*** 서울대학교 농업생명과학연구원
† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582
Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr
2014년 4월 12일 투고
2014년 6월 16일 심사완료
2014년 6월 16일 게재확정

과 SWAT 모형을 비교한 결과 모든 유역에 대해서 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 더 좋은 결과를 나타냈다 (Table 4, 5, Fig. 3, 4, 5, 6). Table 6은 모형별 연평균 유출량을 보여주고 있다. 연평균 유출량의 경우 SWAT 모형은 실측치에 비해 83~101% 범위에서 모의되었으며, Tank 모형은 98~123%의 범위에서 모의되었다. 두 모형 모두 실측치의 유사한 범위 내에서 모의되었으나 유역에 따른 차이가 나타났다.

한편, 갈수기 유출량 모의에 있어 Tank 모형과 SWAT 모형 모두 실측치의 경향을 반영하지 못 하는 것으로 나타나는데, 이는 SWAT 모형과 Tank 모형의 매개변수 보정에 사용되었던 목적함수가 원인이 되었을 것으로 사료된다. 모형의 목적함수로 사용된 SSQ는 실측치와 모의치의 차의 제곱의 합으로부터 계산되기 때문에 매개변수의 최적화 과정에서 목적함수 값을 줄이기 위해 오차가 큰 홍수기에 대해서는 비교적 보정이 잘 되었으나 오차가 작은 갈수기에 대해서는 보정이 잘 되지 않은 것으로 사료된다. Jang et al. (2011)은 SWAT 모형의 auto-calibration 기능을 이용하여 모형을 보정할 때 직접유출과 기저유출로 분리하여 매개변수 보정을 실시하게 될 경우 모형의 정확도 향상에 도움이 될 수 있다고 보고한 바 있다.

한편, Fig. 4, 6에서 SWAT 모형은 Tank 모형에 비해 더 다양한 범위로 저유량이 모의되는 것을 볼 수 있다. 이는 SWAT 모형의 경우 공간 특성을 고려한 준분포형 모형인 반면 Tank 모형은 저유량 모의시 3단 중 하단부에서만 모의가 이루어지기 때문으로 사료된다. 하지만, 모의 기간에 대해서 통계적 변량을 비교하여 평가한 결과 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 대체로 모의능력이 우수한 것으로 나타났다. 이는 유출량 모의에 있어 매개변수가 많은 모형이 더 다양한 범위로 모의할 수는 있으나 더 좋은 결과를 모의하는 것은 아니라는 것을 의미한다. Beven, K. J. (1989, 2007)와 Dunn, S. M. et al. (2008)에 따르면 많은 매개변수는 불확실성을 증가시켜 모형의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있고, 수문모형의 매개변수는 3-4개이면 충분하다고 보고한 바 있다. 따라서 유출량 자료를 보유한 지역에 대한 수문모형 적용 시 Tank 모형의 이용은 편의성을 유지하며 SWAT 모형에 비해 모의 능력이 떨어지지 않는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 6 Comparison of annual runoff between the Tank and SWAT

Watershed	Observed (mm/yr)	SWAT (mm/yr)	Tank (mm/yr)
Boryeong	1130.0	1104.7	1328.5
Miryang	936.1	834.4	984.7
Hoengseong	1041.1	1047.3	1134.7
Yongdam	1001.5	918.5	1231.5

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 유출량 실측자료가 있는 4개의 댐 유역을 대상으로 최적화 기법을 이용하여 Tank 모형과 SWAT 모형의 매개변수를 최적화하고 유출량 모의 값을 비교하고 평가하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 유전자알고리즘을 이용하여 Tank 모형의 매개변수를 보정하고 검증하였다. 검증결과 연평균 유출량은 실측치의 98~123% 범위에서 모의되었으며, R²는 0.74~0.89의 범위를, RMSE는 2.70~5.46 mm의 범위를, NSE는 0.74~0.90의 범위를 갖는 것으로 나타났다.
2. SWAT 모형의 매개변수를 SCE-UA 방법을 이용하여 최적화하고 유출량 모의를 하였다. 검증결과 연평균 유출량은 실측치의 83~101% 범위에서 모의되었으며, R²는 0.57~0.74의 범위를, RMSE는 3.53~7.13 mm의 범위를, NSE는 0.57~0.74의 범위를 갖는 것으로 나타났다.
3. 유역 유출량 모의결과 Tank 모형과 SWAT 모형 둘 다 실측치의 경향성을 잘 반영하는 것으로 나타났으며 Tank 모형이 SWAT 모형에 비해 실측치와의 유사성이 높은 것으로 나타났다. 다만 유역에 따라 오차의 정도가 상이하게 나타났으며, 갈수기에 Tank 모형은 과다 모의하는 경향을, SWAT 모형은 과소 모의하는 경향을 보였다.
4. 본 연구결과 Tank 모형이 SWAT 모형과 비교하여 대체로 우수한 유출량 모의 결과를 보여주었다. 따라서 추후 유출량 자료를 보유한 지역에 대한 수문모형 적용 시 Tank 모형의 이용은 모의능력과 사용자 편의성에 있어서 추천되는 바이다.

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 ‘농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Beven, K., 1989. Changing Ideas in Hydrology – The case of Physically-Based Models. *Journal of Hydrology* 105: 157-172.
2. Beven, K., 2007. Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrology and Earth System Science* 11(1): 460-467.
3. Choi, H. S., 2013. Parameter Estimation of SWAT Model Using SWAT-CUP in Seom-river Experimental Watershed. *Journal of the Korean Society of Civil*

4. 저수지 관개지구의 농업용수 회귀특성 분석 (KCI, 게재)



저수지 관개지구의 농업용수 회귀 특성 분석 Characteristics of Irrigation Return Flow in a Reservoir Irrigated District

송정현* · 송인홍** · 김진택*** · 강문성****,†

Song, Jung Hun · Song, Inhong · Kim, Jin-Taek · Kang, Moon Seong

Abstract

The objective of this study was to investigate characteristics of irrigation return flow from paddy block in a reservoir irrigated district during growing seasons. The irrigation return flow was divided into three parts, quick return flow from irrigation canal (RFI), quick return flow from drainage canal (RFD), and delayed return flow (DRF). The RFI was calculated from water level and stage-discharge relationships at the ends of the irrigation canals. The DRF was estimated using measured infiltration amount from paddy fields of the irrigated district. A combined monitoring and modeling method was used to estimate the RFD by subtracting surface runoff from surface drainage. The paddy block irrigated from the Idong reservoir was selected to study the irrigation return flow components. The results showed that daily agricultural water supply (AWS), the RFI, and the RFD were 27.4 mm day⁻¹, 4.9 mm day⁻¹, and 19.8 mm day⁻¹, respectively in May, which were greater than other months ($p < 0.05$). The return flow ratio of the RFI and the RFD were the greatest in July (34.6%) and May (72.3%), respectively. The daily AWS was closely correlated with the RFD (correlation coefficients of 0.76-0.86) in except for July with, while correlation coefficient with the RFI were 0.56 and 0.42 in June and July, respectively ($p < 0.01$). The total irrigation return flow was 1,965 mm in 2011, and 1,588 mm in 2012, resulting in total return flow ratio of 84.6% and 79.1%, respectively. This results indicate that substantial amounts of agricultural water were returned to streams as irrigation return flow. Thus, irrigation return flow should be fully considered into the agricultural water resources planning in Korea.

Keywords: Irrigation return flow; return flow ratio; water balance; drainage; paddy

1. 서 론

수리시설물에서 공급된 농업용수는 전량 작물에 의해 소비되는 것이 아니며, 포장으로 공급되지 않고 용수로를 통해 배수되기도 한다. 포장으로 공급된 수량은 물꼬를 넘어 배수되기도 하고, 일부는 침투되어 지하수를 통해 흘러나가기도 한다. 이와 같이, 농업용수 공급량 중 소비되지 않고 하천으로 유입되는 수량을 관개회귀수량 (irrigation return flow)이라 한다 (Im and Park, 2006; Dawandel et al., 2008; Song et al., 2013a).

관개회귀수량은 농업구역의 하천 유량을 구성하는 중요한

성분으로 취수시설의 설계와 관개조직의 운영, 용수수급계획, 하천 유형의 예측, 환경용수 방류량의 결정, 그리고 농업비점오염원 관리 등 유역 수자원관리에 있어 중요한 요소로 작용한다 (Im, 2000; Causape et al., 2006; Lin and Garcia, 2012; Poch-massegu et al., 2014). 하지만, 관개회귀수량은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 농업용수 공급량, 물꼬 높이, 담수심 관리 방식 등 인위적 요소의 영향을 동시에 받기 때문에 그 기작이 복잡한 특징을 가진다 (Gosain et al., 2005; Song, 2013; Masashi et al., 2014).

우리나라의 수자원장기종합계획에서는 농업용수 공급량의 약 35%가 하천으로 회귀되는 것으로 예상하고 있다 (MOLIT, 2011). 하지만, 선행연구의 조사 결과에 의하면 농업용수 회귀율은 용수 공급 현황과 물관리 방식에 따라 약 32~86%의 범위로 지역별로 다양하게 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Im, 2000; Choo, 2004a; Chung and Park, 2004; Kim et al., 2010). 따라서, 합리적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 지역별 농업용수 공급 현황과 물관리 방식이 반영된 농업용수 회귀율이 물이용 계획에 이용될 필요가 있다.

관개회귀수량 조사에 관한 연구는 효율적인 수자원 이용의 측면에서 국내외에서 이루어져왔다. 국내에서는 관개량, 침투량, 그리고 배수량 성분의 관측 자료를 이용하여 관개회

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

*** Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

**** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: November 19, 2014

Revised: December 16, 2014

Accepted: December 22, 2014

한편, Song et al. (2013a)에 따르면 이동저수지 관개지구의 전체 면적 (1,788.7 ha)에 대한 2001~2009년 연별 공급량은 1,311.8~1,848.6 mm로 관측되고 있으며, 본 연구 결과에서의 10.3 ha 광역 눈에 대한 공급량에 비해 더 낮게 관측되고 있다. 실제 관개지구에서는 모든 면적에 대해 용수가 균등하게 관개되지 않을 수 있으며 (Park, 2007), 위와 같은 차이는 본 연구의 10.3 ha 광역 눈에 대해 관개가 집중되는 물관리가 이루어졌기 때문으로 사료된다. 따라서 이동저수지 관개지구 전체에 대한 농업용수 회귀율은 본 연구 결과에 비해 낮아질 가능성이 있을 것으로 사료된다.

본 연구와 선행 연구결과를 포함한 농업용수 회귀율 분석 결과는 Im (2000)와 Choi and Choi (2002)의 결과를 제외하고는 모두 우리나라 수자원장기종합계획 (MOLTM, 2011)에서 제시하는 35%를 벗어나고 있다. Choi and Choi (2002)의 결과는 자연회귀수량에 따른 회귀율이 고려되면 35%보다 높아질 것으로 사료된다. 따라서, 향후 합리적이고 경제적인 수자원 이용 및 관리를 위해서는 축적된 조사 결과를 바탕으로 한 회귀율 자료가 물이용 계획에 반영되어야 할 것으로 사료된다 (Kim et al., 2010).

Noh (2003)에 의하면, 회귀수량을 고려하여 유출량을 모의한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 실측치에 더 유사하게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서와 같이 용수 공급이 용이한 지역은 관개회귀수량을 고려하지 않고 하천 유출량을 모의하는 경우는 오차가 더 커질 것으로 예상되며, 향후 이와 같은 지역에 대한 수문수질 모델링 수행시 관개회귀수량은 고려되어야 할 중요한 성분이라 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 용수 공급이 용이한 관개지구에서의 농업용수 회귀특성을 분석하기 위하여 이동저수지 관개지구를 대상으로 2011~2012년 기간의 관개회귀수량을 산정하였다. 관개회귀수량은 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 그리고 자연회귀수량으로 구분하여 모니터링과 모델링 기법을 병행하여 산정하였으며, 산정한 관개회귀수량 구성성분의 시기별 특성을 통계적인 방법을 이용하여 분석하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상지구의 일별 용수로 회귀수량, 배수로 회귀수량, 자연회귀수량, 그리고 총 회귀수량은 각각 0.0~14.9 mm day⁻¹, 0.0~42.3 mm day⁻¹, 0.4~1.8 mm day⁻¹, 그리고 0.6~48.6 mm day⁻¹의 범위로 나타났으며, 그 양의 시기적 편차가 큰

것으로 분석되었다.

2. ANOVA를 통한 월별 일 평균 비교 결과, 농업용수 공급량은 5월에 27.4 mm day⁻¹로, 용수로 회귀수량은 5월과 6월에 각각 4.9 mm day⁻¹과 4.1 mm day⁻¹로, 그리고 배수로 회귀수량은 5월에 19.8 mm day⁻¹로 다른 기간에 비해 유의수준 5% 이내에서 높게 나타났으며, 해당시기의 관개회귀수량이 가장 높게 나타난 원인은 농업용수 공급량이 해당시기에 높았기 때문으로 사료된다.
3. 배수로 회귀율은 5월에 72.3%로 용수로 회귀율은 7월에 34.6%로 가장 높게 나타났다. 용수로 회귀율과 용수로 회귀수량이 높게 나타난 시기가 서로 달랐는데, 이는 7월의 공급량이 낮아 용수로 회귀수량이 낮았으나, 강우량이 높았고 중간낙수가 실시되어 공급량 증 용수로로 통해 회귀되는 비율이 높아진 것으로 분석되었다.
4. 농업용수 공급량과 배수로 회귀수량 및 용수로 회귀수량의 상관분석 결과, 배수로 회귀수량은 7월을 제외하면 공급량과 0.76~0.86의 높은 상관관계가 나타났고, 용수로 회귀수량은 6월과 7월에 각각 0.56과 0.42로 높은 상관관계를 보였다.
5. 본 연구 대상지의 총 회귀수량은 2011년 1,965 mm, 2012년 1,588 mm으로 나타났고, 농업용수 회귀율은 2011년 84.6%, 2012년 79.1%로 선행연구결과와 비교하여 비교적 높게 나타났다.

본 연구에서와 같이 농업용수 공급량이 높게 나타나는 지역은 관개회귀수량과 농업용수 회귀율이 높게 나타나며 이는 하천 유량을 구성하는 주요한 성분으로 사료된다. 또한, 관개회귀수량은 수문수질 모델링 시에 고려되어야 할 주요 요인으로 사료된다. 본 연구 결과는 관개회귀수량에 대한 전반적인 이해를 넓히며, 물이용 계획 수립을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원의 “농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발”과제 (과제번호: 112041-3)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Causape, J., D. Quilez, and R. Aragues, 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro

5. 연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의 (KCI, 게재)

韓國水資源學會論文集
第48卷 第6號·2015年 6月
pp. 425~438

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 6:425-438, June 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWARA.2015.48.6.425
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

연단위 관개효율 변화를 고려한 관개지구 용수 공급량 모의 Simulation of Agricultural Water Supply Considering Yearly Variation of Irrigation Efficiency

송 정 헌* / 송 인 흥** / 김 진 택*** / 강 문 성****

Song, Jung Hun / Song, Inhong / Kim, Jin Taek / Kang, Moon Seong

Abstract

The objective of this study was to evaluate simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency. The water supply data of the Idong reservoir from 2001 through 2009 was collected and used for this study. Total 6 parameters including irrigation efficiency (E_s), drainage outlet height, and infiltration, were used for sensitivity analysis, calibration, and validation. Among the parameters, the E_s appeared to be the most sensitivity parameter. The E_s was calibrated on a yearly basis considering sensitivity and time-varying characteristic, while other parameters were set to fixed values. The statistics of percent bias ($PBIAS$), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and root means square error to the standard deviation of measured data (RSR) for a monthly step were 2.7%, 0.93, and 0.26 for the calibration, and 3.9%, 0.89, and 0.32 for the validation, correspondently. The results showed a good agreement with the observations. This implies that the modeling only with appropriate parameter values, apart from modeling approaches, can simulate the real supply operation reasonably well. However, the simulations with uncalibrated parameters from previous studies produced poor results. Thus, it is important to use calibrated values, and especially, we suggest the E_s 's yearly calibration for simulating agricultural water supply.

Keywords : agricultural water supply; irrigation water requirement; irrigation efficiency; sensitivity analysis; model evaluation

요 지

본 연구에서는 관개효율의 연별 변화와 필요수량을 고려하여 추정된 관개지구 용수 공급량이 현장에서 실제 공급되는 수량을 잘 모의하는지를 평가하였다. 대상지구로 이동저수지 지구를 선정하여, 2001~2009년 기간에 대한 실측 공급량 자료를 구축하였다. 관개효율, 물꼬 높이, 침투량 등 총 6개의 매개변수에 대해 민감도 분석, 보정 및 검정을 수행하였다. 민감도 분석 결과, 관개효율이 가장 민감한 매개변수로 나타났다. 관개효율은 가장 민감하게 나타난 점과 연마다 값이 달라지는 특징을 반영하여 연별로 보정하였다. 통계적 지표 산정 결과 월단위에 대한 $PBIAS$, NSE , 그리고 RSR 은 보정기간 동안 각각 2.7%, 0.93, 0.26로, 검정기간 동안 각각 3.9%, 0.89, 0.32로 매우 우수하게 나타났다. 따라서 비록 농업용수 공급량은 인위적 요소이나, 적절한 매개변수 값을 사용하여 모의한다면 모의치가 실측치와 유사하게 모의될 수 있을 것이다. 하지만 대상지구의 실측 자료가 확보되지 않아 보정되지 않은 매개변수를 사용하는 경우 결과가 매우 안 좋을 수 있을 가능성이 나타났다. 따라서 농업용수 공급량의 모의 시 적절한 매개변수의 선정은 매우 중요한 것으로 사료되며, 특히 관개효율은 연별로 보정하는 것을 제안한다.

핵심용어 : 농업용수 공급량, 필요수량, 관개 효율, 민감도 분석, 모형의 평가

* 서울대학교 지역시스템공학전공 연구원 (e-mail: songjh65@gmail.com)

Researcher, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

** 서울대학교 농업생명과학연구원 연구교수 (e-mail: inhongs@gmail.com)

Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원 (e-mail: jtkim@ekr.or.kr)

Chief Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Gyeonggi-do, Korea

**** 교신저자, 서울대학교 지역시스템공학전공 부교수, 농업생명과학연구원, 그린바이오과학기술연구원 (e-mail: mskang@snu.ac.kr)

Tel: 82-2-880-4582

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Seoul, Korea

으로 사료되고, 이에 관한 연구가 필요할 것이다.

최근 농업용 저수지의 이용 목적은 단순히 농업용수 공급이외에도 홍수 조절, 환경용수 방류 등과 같은 목적 또한 요구되고 있으며, 이를 반영한 새로운 운영 규정이 필요할 것이다. 이러한 관점에서 본 연구 결과는 최적의 농업용수 공급 운영을 위한 중요한 연구 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구 결과는 농업용수 공급량의 모의를 위한 전반적인 이해를 도우며, 향후 관개 구역 단위의 합리적인 공급량 산정을 위한 실질적인 방법론 및 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원(첨단생산기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었음(No. 112041-3).

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Anan, M., Yuge, K., Nakano, Y., Funakoshi, T., and Haraguchi, T. (2004). "The relationship between water intake rates, paddy ponding depth, and farmers' water management techniques." *Paddy and Water Environment*, Vol. 2, No. 1, pp. 11-18.
- Anbumozhi, V., Yamaji, E., and Tabuchi, T. (1998). "Rice crop growth and yield as influenced by changes in ponding water depth, water regime and fertigation level." *Agricultural Water Management*, Vol. 37, No. 3, pp. 241-253.
- Bos, M.G., and Nugteren, J. (1990). On irrigation efficiencies. Report 19, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, pp. 91.
- Cho, J., and Mostaghimi, S. (2009). "Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT): Model application." *Biosystems Engineering*, Vol. 102, No. 4, pp. 500-515.
- Chung, H.W., Kim, S.J., Kim, J.S., Noh, J.K., Park, K.U., Son, J.K., Yoon, K.S., Lee, K.H., Lee, N.H., Chung, S.O., Choi, J.D., and Choi, J.Y. (2006). *Irrigation and Drainage Engineering*. Dongmyeong Publisher.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., and Yapo, P.O. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Howell, T.A. (2003). "Irrigation efficiency." *Encyclopedia of water science*, Marcel Dekker, New York, pp. 467-472.
- Huh, Y.M., Park, C.E., and Park, S.W. (1993). "A stream-flow network model for daily water supply and demands on small watershed (II): model development." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 23-32.
- Im, S.J., Park, S.W., and Kim, H.J. (2000a). "Methodology for estimating agricultural water supply in the Han River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 6, pp. 765-774.
- Im, S.J., Park, S.W., Chin, Y.M., and Yoon, K.S. (2000b). "Development of CREAMS-PADDY model." *Proceedings 2000 ASAE Annual International Meeting*, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp. 1-13.
- Im, S.J., Park, S.W., Kim, S.M., and Kim, H.J. (2000c). "Surveying the daily pumpage for irrigating paddy rice in the Han River basin." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 42, No. 1, pp. 57-65.
- James, L.D., and Burgess, S.J. (1982). "Selection, calibration and testing of hydrologic models." *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, Edited by Haan, C.T., Johnson, H.P., and Brakensiek, D.L., ASAE, St. Joseph, Mich, pp. 437-472.
- Jesiek, J.B., and Wolfe, M.L. (2005). "Sensitivity analysis of the Virginia phosphorus index management tool." *Transactions of the ASAE*, Vol. 48, No. 5, pp. 1773-1781.
- Ju, W.J., Kim, J.T., Park, K.W., and Lee, Y.J. (2006). "Developing of system for estimating water demand considering variation of farming conditions in paddy field." *KCID Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 82-90.
- Kang, M.G., Oh, S.T., and Kim, J.T. (2014). "Estimation of amounts of water release from reservoirs con-

6. 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발 (KCI, 게재)



TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발 Regression Equations for Estimating the TANK Model Parameters

안지현* · 송정현** · 강문성***† · 송인홍**** · 전상민** · 박지훈**

An, Ji Hyun · Song, Jung Hun · Kang, Moon Seong · Song, Inhong · Jun, Sang Min · Park, Jihoon

Abstract

The TANK model has been widely used in rainfall-runoff modeling due to its simplicity of concept and computation while achieving forecast accuracy. A major barrier to the model application is to determine parameter values for ungauged watersheds, leading to the need of a method for the parameter estimation. The objective of this study was to develop regression equations for estimating the 3th TANK model parameters considering their variations for the ungauged watersheds. Thirty watersheds of dam sites and stream stations were selected for this study. A genetic algorithm was used to optimize TANK model parameters. Watershed characteristics used in this study include land use percent, watershed area, watershed length, and watershed average slope. Generalized equations were derived by correlating to the optimized parameters and the watershed characteristics. The results showed that the TANK model, with the parameters determined by the developed regression equations, performed reasonably with 0.60 to 0.85 of Nash-Sutcliffe efficiency for daily runoff. The developed regression equations for the TANK model can be applied for the runoff simulation particularly for the ungauged watersheds, which is common for upstream of agricultural reservoirs in Korea.

Keywords: TANK model; runoff; watershed characteristics; regression equation

1. 서 론

국내에 산재한 저수지는 2010년을 기준으로 총 17,531 개로 한국농어촌공사와 사군에서 관리하고 있다. 관리자들은 저수지 관리 시 시설물 안전에 우선순위를 뒀는데 불구하고, 효율적인 물 관리를 위한 저수지 상하류의 수문 순환 성분에 대한 계측이 미흡하다. 특히 저수지 상류 유역은 대부분 미계측 유역으로 강우량, 유출량 등의 수문기상자료와 관개용수 공급량, 관개지구 용수로의 수위변화 등에 대한 계측 자료가 부족하여 저수지 설계 및 운영을 위한 정확한 유입량 예측에 어려움이 많다 (Kang et al., 2013).

- * Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology in Food, Agriculture, Forestry and Fisheries
- ** Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University
- *** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
- **** Research Institute of Agricultural and Life Sciences, Seoul National University
- † Corresponding author
Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: July 3, 2015

Revised: July 16, 2015

Accepted: July 17, 2015

일반적으로 유출량 또는 저수지 및 댐 유입량을 모의하기 위해서 강우-유출모형을 이용하고 있으며, 이러한 모형들은 수문사상을 보다 사실에 가깝게 모의하기 위하여 많은 매개변수들을 가진다. 하지만, 이러한 매개변수는 유역의 지형적 특성, 수문학적 특성 등에 따라 결정되므로 미계측 유역에 매개변수가 많은 모형을 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 매개변수 수가 적은 개념적 강우-유출 모형을 미계측 유역에 적용하여 유출량 또는 유입량을 예측하고 있으며, 그 중에서도 매개변수가 비교적 적고 단순한 구조를 가지면서도 비선형적인 수문현상을 효과적으로 반영하는 TANK 모형을 많이 이용하고 있다.

국내에서는 TANK 모형의 매개변수를 추정하기 위하여 유역특성인자와 매개변수 간 회귀식에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. Kim and Park (1986)은 2.75~7,126 km²의 6개 유역에 대하여 4단 TANK의 매개변수를 일반화시키려고 시도하였으며, 또한 Kim and Park (1988)은 3단 TANK의 매개변수를 4가지 유역 인자에 의하여 일반화시켜 Daily Irrigation Reservoir Operation Model (DIROM)을 개발하였다. Heo (1992)은 6개의 유역 인자를 이용하여 3단 TANK의 매개변수를 일반화하였으며, 10개 유역에 대하여 그 적용성을 평가하였다. Kim et al. (2000)은 26개의 하천유역을 대상으로 3단 TANK의 매개변수를 7개의 유역 인자에 대하여 일반화한 바 있으며, 최근에는 Kang et al. (2013)이 Heo (1992)에 의해 개발되었던 수정 TANK 모형의 3단 지하배수과정을 생략하

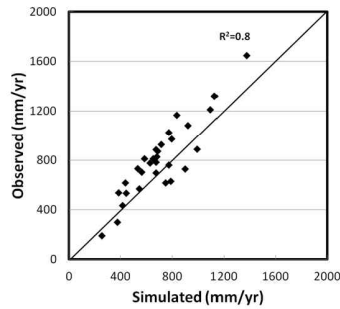


Fig. 6 Scatter plots comparing annual average runoff from observed values and simulated values by the regression equations

4. 개발된 회귀식을 이용하여 모형의 매개변수를 추정하였으며, 이를 TANK 모형에 적용하여 30개 대상유역의 유출량을 모의하고 그 결과를 실측 유출량과 비교함으로써 그 적용성을 평가하였다. 통계적 변량 평가 결과, 최적 매개변수에 의한 모의 결과에 비해 다소 모의 능력이 낮았으나, 30개 유역 중 29개에서 NSE가 0.75 이상으로 나타나 Moriasi et al. (2007)의 기준상 “very good”으로 나타나, 그 적합성이 높은 것으로 평가되었다.

본 연구에서 개발된 일반화된 회귀식은 기존에 제시된 회귀식보다 통계적으로 높은 정확도를 보였으며, 향후 임의의 유역에 대한 장기유출량 모의 시 보다 신뢰성 높은 결과를 나타낼 것으로 기대된다. 하지만 본 연구에서 개발된 회귀식은 무강우 시 기저유출량이 실측값에 비하여 과소 모의되는 한계가 있어 모형의 보정 시 기저유출량 모의에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

향후, 더 많은 유역을 대상으로 유역경사구간을 고려하고 기저유출모의 특성에 대한 분석을 추가적으로 고려한 뒤 회귀식을 개발하여 장기유출량을 모의한다면, 용수공급량, 무효방류량 등의 자료 획득에 어려움이 있는 비계측 저수지유역의 유역관리, 설계 및 운영 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원 (첨단생산기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었음 (No. 112041-3).

REFERENCES

- Engel B., D. Storm, M. White, and J. G. Arnold. 2007. A hydrologic/water quality model application protocol. *Journal of the American Water Resources Association* 43(5): 1223-1236.
- Han, S. H., 1994. Application of rainfall-runoff model for the runoff analysis. Master Dissertation, Kangwon National University (in Korean).
- Heo, Y. M., 1992. A streamflow network model for daily water supply and demands on small watershed. Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press.
- Kang, M. G., J. H. Lee, and K. W. Park, 2013. Parameter regionalization of a Tank model for simulating runoff from ungauged watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association* 46 (5): 519-530 (in Korean).
- Kim, C., and S. K. Kim, 2004. Parameter optimization of Tank model using geographic data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 24 (6): 553-560 (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1986. An evaluation of parameter variations for a linear reservoir (Tank) model with watershed characteristics. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 28 (2): 42-52 (in Korean).
- Kim, H. Y., and S. W. Park, 1988. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs (1). *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 30 (1): 50-62 (in Korean).
- Kim, J. Y., and S. O. Jung, 2001. Sensitivity analysis for Tank model's parameters. *Journal of KCID* 8 (2): 55-63 (in Korean).
- Kim, S. J., P. S. Kim, and C. Y. Yoon, 2000. A regression equation of Tank model parameters for daily runoff estimation in a region with insufficient hydrological data. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers Symposium* 412-418 (in Korean).
- Kim, S. J., Y. G. Jee, and P. S. Kim, Parameter optimization of long and short term runoff models using genetic algorithm. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 46 (5): 41-52 (in Korean).
- Lee, S. Y., T. G. Kim, J. M. Lee, E. J. Lee, M. S. Kang, S. W. Park, and J. J. Lee, 2009. Comparison of estimating parameters by univariate search and genetic algorithm using Tank Model. *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers* 51 (3): 1-8 (in Korean).
- Ministry of Construction Transportation (MCT), 1999. A study of optimization for water resources planning (III): The assessment of water supply reliability and development of water supply planning system. Korea Institute of Civil Engineering

7. 농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법 개발 (KCI, 게재)



농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법 개발 Web-Based Data Processing and Model Linkage Techniques for Agricultural Water-Resource Analysis

박지훈* · 강문성**† · 송정현* · 전상민* · 김계웅* · 류정훈*

Park, Jihoon · Kang, Moon Seong · Song, Jung-Hun · Jun, Sang Min · Kim, Kyeung · Ryu, Jeong Hoon

Abstract

Establishment of appropriate data in certain formats is essential for agricultural water cycle analysis, which involves complex interactions and uncertainties such as climate change, social & economic change, and watershed environmental change. The main objective of this study was to develop web-based Data processing and Model linkage Techniques for Agricultural Water-Resource analysis (AWR-DMT). The developed techniques consisted of database development, data processing technique, and model linkage technique. The watershed of this study was the upper Cheongmi stream and Geunsam-Ri. The database was constructed using MS SQL with data code, watershed characteristics, reservoir information, weather station information, meteorological data, processed data, hydrological data, and paddy field information. The AWR-DMT was developed using Python. Processing technique generated probable rainfall data using non-stationary frequency analysis and evapotranspiration data. Model linkage technique built input data for agricultural watershed models, such as the TANK and Agricultural Watershed Supply (AWS). This study might be considered to contribute to the development of intelligent watercycle analysis by developing data processing and model linkage techniques for agricultural water-resource analysis.

Keywords: Agricultural watershed; watercycle analysis; web-based; data processing; model linkage

1. 서론

농촌유역의 물순환은 기후변화, 유역환경변화, 사회/경제적 변화 등과 같은 다양한 요인의 상호작용과 불확실성을 수반하며 발전하고 있다. 이러한 다양한 요인들을 고려하기 위해 통합 물관리 기법을 수립하여 실현하려는 노력을 기울이고 있다. 농촌유역의 통합 물관리를 위해서는 물순환을 구성하는 다양한 모의 요소들을 하나의 독립된 객체로 모듈화하여 우리나라 농촌유역의 복잡성을 해석할 수 있어야 한다. 또한 다양한 요인에서 기인하는 우리나라 농촌유역의 물순환 해석은 방대한 시공간 정보를 필요로 한다. 따라서 모의 요소별로 필요한 자료를 데이터베이스로 구축하고, 구축한 데이터베이스를 물순환 해석에 적합한 자료로 추출 및 가공하여

전처리를 할 수 있는 정보 시스템의 개발이 필요하다. 특히 기존의 구축된 다양한 국가정보시스템에서 필요한 자료를 실시간으로 수집하여 데이터베이스로 구축하고 물순환 해석에 필요한 자료 형태로 가공하여 제공하는 기법은 농촌유역의 물순환 해석에서 중요하다.

자료 관리에 대한 연구는 대부분 각 분야에 국한되어 자료의 품질 관리 및 자료 변환에 초점을 맞추어 이루어졌다. 자료 품질 관리 기준을 적용해서 자료의 정도를 높이거나 알고리즘 등의 수학적 기법을 적용해 이상치를 보정하는 방법에 대해 중점적으로 수행되었다. Chac et al. (2014)은 시계열 및 통계 분석을 이용하여 복합기상센서의 특성을 고려한 기상자료의 품질관리시스템 (Quality Control system for Integrated Meteorological Sensor data, QCIMS)을 개발한 바 있다. Kim et al. (2012)은 우리나라 강수지역을 구분하기 위해 4가지 자료 전처리 기법을 적용하여 군집분석을 수행하였다. 군집분석을 수행하기 전에 사용한 4가지 자료 전처리 기법으로는 일반 정규화 방법, 수정된 정규화 방법, Z-score 방법, 요인분석을 사용하였고, 군집분석은 K-means 방법을 선택하여 분석하였다. Kang et al. (2008)은 경제적이고 환경적인 계분관리를 위해 영양물질 관리 계획 수립, 이송 분석, 자료 관리 등의 기능을 제공하는 GIS 기반 PLDSS (Poultry Litter Decision Support System)를 개발하였다. Kwon et al. (2007)은 미기

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University
** Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University
† Corresponding author
Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr
Received: July 28, 2015
Revised: August 17, 2015
Accepted: September 18, 2015

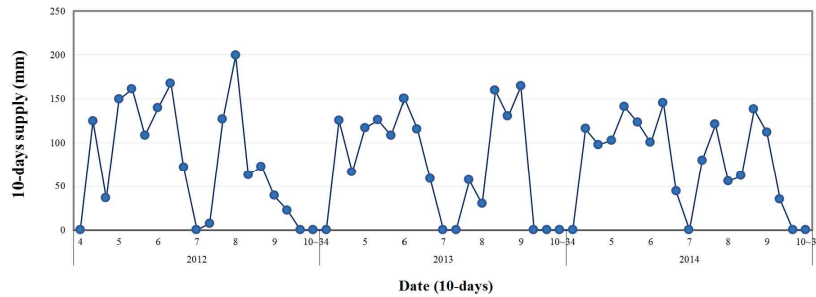


Fig. 12 Simulated agricultural water supply for 10-days time step by model linkage with the AWS model

있다. 대상 유역의 강우량은 이천 관측소의 자료를 사용하였고, 토지 이용 비율을 An et al. (2015)이 개발한 회귀식에 대입하여 미계측 유역을 모의하기 위해 필요한 매개변수를 추정하였다.

나. 농업용수 공급량 모의 모형

Fig. 12는 모형 연계 기법을 통해 구축한 입력 자료를 이용하여 청미천 유역의 농업용수 공급량을 모의한 결과를 보여 주고 있다. 농업용수 공급량 모의를 위해 필요한 매개변수는 Song et al. (2015)이 제안한 최적 매개변수를 사용하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양하게 변화하는 농촌유역의 물순환 해석을 위해 맞춤형 데이터베이스를 설계하고 농촌유역을 특징을 대표하는 자료를 구축하였다. 이미 구축한 데이터베이스를 이용하여 농촌유역 물순환 해석을 위해 필요한 자료를 생산할 수 있는 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하였다.

AWR-DMT의 데이터베이스는 유역 특성, 저수지, 기상, 수문, 관개지구 등으로 분류하여 개체관계도를 설계한 다음 MS SQL을 이용하여 구축하였다. 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하기 위해 TANK 모형과 농업용수 공급량 모형을 선정하였다. 자료 전처리 기법은 농촌유역 물순환 해석을 위해 적합한 자료를 구축할 수 있도록 개발하였다. 비정상성을 고려한 빈도분석을 통해 확률강우량을 산정하고 농촌유역의 증발산량을 추정하는 자료 전처리 기법을 개발하였다. 모형 연계 기법은 TANK 모형과 농업용수 공급량을 대상으로 이미 구축한 데이터베이스에서 입력 자료를 생성하도록 개발

하였고, 이를 모형에 적용하여 모의한 결과를 도시하였다.

AWR-DMT 웹페이지는 기상 자료, 수문 자료, 자료전처리, 모형 연계 등으로 구성하였고 Python을 이용하여 개발하였다. 데이터베이스에 구축한 자료를 도시 및 출력할 수 있으며 모형 연계를 통해 모형 모의에 필요한 입력 자료를 생성할 수 있다.

본 연구에서 개발한 AWR-DMT는 다양하게 존재하는 자료를 농촌유역 물순환 해석 목적에 맞게 적절하게 가공하여 모형의 입력 자료로 활용하고 이들 상호간의 연계를 위한 자료 형식 통일 등 구성 연계기술 정립이 가능할 것으로 사료된다. 향후 AWR-DMT의 적용성을 확보하기 위해 모형의 적용 결과를 실제 계측자료와 비교하여 신뢰성 있는 결과를 도출한다면 지능형 물순환 해석 및 관리 기법 개발 및 적용으로 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기후변화에 대응하여 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화·복합화에 따른 용수구역 단위의 종합적인 농촌유역 물순환 해석에 필요한 자료의 구축 및 전처리와 모형 연계 자료 구축을 제공하는 웹기반 기법 관련 원천기술 확보가 기대된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원(첨단생산기술개발사업)의 지원을 받아 연구되었음(No. 112041-3).

REFERENCES

1. An, J. H., J. H. Song, M. S. Kang, I. H. Song, S. M. Jun, and J. Park, 2015. Regression equations for estimating the TANK

8. Paddy Field Modeling System for Water Quality Management (SCIE, 게재 확정)

PADDY FIELD MODELLING SYSTEM FOR WATER QUALITY MANAGEMENT

JUNG HUN SONG¹, JEONG HOON RYU¹, JIHOON PARK¹, SANG MIN JUN¹, INHONG SONG², JEONGRYEOL JANG³, SANG MIN KIM⁴ AND MOON SEONG KANG^{5*}

¹*Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Republic of Korea*

²*Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Republic of Korea*

³*Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Republic of Korea*

⁴*Department of Agricultural Engineering, Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Republic of Korea*

⁵*Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Republic of Korea*

*Correspondence to: M. S. Kang, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea. E-mail: mskang@snu.ac.kr, Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a paddy field modelling system for predicting pollutant (nutrient) loads and evaluating various Best Management Practices (BMPs) on paddy fields. The system consists of a pre-processing component, the CREAMS-PADDY (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems for PADDY), and a post-processing component. The CREAMS-PADDY model was selected as the core model. The pre-processing component includes manipulation of meteorological data, management of input parameters such as spatial characteristics and farming methods, batch running, and implementing various scenarios. The post-processing component contains visualization of water balance and nutrient balance components and statistical analysis for calibration, validation, and application. To evaluate the applicability of the developed system, reduction effects on water control methods in paddy fields were simulated. Model parameters related to hydrology and water quality were calibrated and validated by comparing model predictions with the field data collected for two years. The simulation results indicated that reducing the nutrient loss through surface drainage by water-saving irrigation and raising the height of drainage outlet could protect downstream water quality. The simulation system will be a useful tool for planning BMPs to reduce nutrient loads from paddy fields in various regions including Korea.

KEY WORDS: CREAMS-PADDY; modelling system; nutrients; paddy fields; pollutant loads; water quality

INTRODUCTION

Rice is the staple food for almost half of the world's population, with total annual production of about 685 million tons on 159 million ha (Yoon *et al.*, 2001; Patil *et al.*, 2011; FAO, 2010). In the Republic of Korea (Korea), paddy fields accounted for 9.6% (0.96 million ha) of total land area (10.03 million ha) in 2013 (MAFRA, 2014).

9. Probabilistic Risk Assessment of Flood Disaster in South Korea under the Impact of Climate Change (SCIE, 게재 확정)

PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT OF FLOOD DISASTER IN SOUTH KOREA UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE

JIHOON PARK¹, MOON SEONG KANG^{2*}, JUNG-HUN SONG¹, SANG MIN JUN¹ AND
INHONG SONG³

¹*Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Republic of Korea*

²*Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Republic of Korea*

³*Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Republic of Korea*

*Correspondence to: M. S. Kang, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea. E-mail: mskang@smu.ac.kr, Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a probabilistic method for flood-risk assessment under climate change. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) released the Representative Concentration Pathways (RCP) in preparation for climate change; the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were selected to examine future flood damage. The study area was South Korea. The spatial and temporal resolutions were on a city and county basis, and four time periods (1990s: 1976-2005, 2025s: 2011-2040, 2055s: 2041-2070 and 2085s: 2071-2100). Proxy variables were selected to assess flood risk. Indicators were standardised using the Z-score method and principal component analysis was conducted to calculate the weighting of indicators. Probability distribution of each indicator was fitted to analyse the flood risk.

10. Water Balance Analysis in Agricultural Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation (SCI, 게재 확정)

Water Balance of Irrigation Reservoirs Considering Flood Control and Irrigation Efficiency Variation

Jung Hun Song, S.M.ASCE¹; Moon Seong Kang²; Inhong Song³; Sang Min Jun⁴

¹ Research Associate, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea, E-mail: songjh65@gmail.com

² Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea (Corresponding author). E-mail: mskang@snu.ac.kr

³ Research Professor, Research Institute for Agricultural & Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea. E-mail: inhongs@snu.ac.kr

⁴ Research Associate, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea, E-mail: luckyjsm55@naver.com

ABSTRACT The combination of limited water resources and ever-growing water demand requires more accurate approaches for reservoir water balance analyses. The goal of this study was to develop a new operation scheme by considering flood control and irrigation efficiency variation for simulating reservoir water balance components. Observed reservoir water levels from four reservoirs in Korea were used to evaluate the new scheme. As the result of a sensitivity analysis, variations in irrigation efficiency appeared to be most sensitive for the outflow variables and was thus calibrated on a yearly basis for the new scheme. Other parameters were calibrated to fixed values. Compared with two other operation schemes, i.e., excluding the flood control and

11. Development of a Component-Based Modeling Framework for Agricultural Water-Resource Management (SCI, 심사중)

DEVELOPMENT OF A COMPONENT-BASED MODELING FRAMEWORK FOR AGRICULTURAL WATER-RESOURCE MANAGEMENT

M. S. Kang^a, P. Srivastava^b, J. H. Song^c, J. Park^c, Y. Her^d, S. M. Kim^e, I. Song^{f,†}

^a Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

^b Department of Biosystems Engineering, Auburn University, Auburn, AL, USA

^c Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

^d Blackland Research & Extension Center, Texas A&M AgriLife Research, Texas A&M University, Temple, TX, USA

^e Department of Agricultural Engineering, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

^f Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

[†]Corresponding author: 599 Gwanakno, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Republic of Korea, Tel.: +81-2-880-4618, Fax: +81-2-877-2087, E-mail address: inhongs@snu.ac.kr (I. Song)

Abstract

Because of the many complicating factors inherent in water-cycle analyses of agricultural watersheds, for efficient water management, hydrologic modeling must be carefully designed to reflect the physical characteristics along with complex and diverse agricultural practices. Hence, component-based modeling approaches are needed to consider a number of processes concurrently and comprehensively, especially irrigation-reservoir operation and paddy-farming practices, into water-cycle models of agricultural watersheds. The primary objectives of this study were twofold: (1) to develop a Component-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM) using an object-oriented programming technique; and (2) to evaluate its applicability for an agricultural watershed with diverse and complicated land use as a case study. COMFARM is a user-friendly, highly interoperable, and lightweight

12. 다중회귀분석을 이용한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정 (KI, 심사중)

다중회귀분석을 이용한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

Estimation of LOADEST Coefficient using Multi-linear Regression

김계웅* / 강문성** / 송정현***

Kim, Kyeung / Kang, Moon Seong / Song, Jung Hun

Abstract

The objective of this study was to estimate LOADEST (LOAD Estimator) coefficient for simulating pollutant loads in ungauged watersheds. Regression models of LOADEST were used to simulate pollutant loads, and the multiple linear regression (MLR) was used for coefficient estimation on watershed characteristics. The fifth and third model of LOADEST were selected to simulate T-N and T-P loads, respectively. Eighty one watersheds were selected to estimate model coefficient using MLR, and simulate pollutant loads. The results and statistics indicated that regression models based on LOADEST simulated pollutant loads reasonably and model coefficients were reliable. However, the results also indicated that LOADEST underestimated pollutant loads and had a bias. For this reason, simulated loads were corrected the bias by a quantile mapping method in this study. Corrected loads indicated that the bias correction was effective. Using multiple regression analysis, a coefficient estimation methods according to the watershed characteristic were developed. Coefficients which calculated by MLR were used in models. The simulated result and statistics indicated that MLR estimated the model coefficients reasonably. Regression models developed in this study would help simulate pollutant loads for ungauged watersheds and be a screen model for policy decision.

keyword : regression model, pollutant loads, LOADEST, MLR

요 지

본 연구에서는 미계측 유역에서 오염부하량 모의를 위해, 81개 유역을 대상으로 LOADEST (LOAD Estimator) 기반 회귀모형의 최적 매개변수를 추정하고, 다중회귀분석과 인공신경망 기법을 이용하여 유역특성에 따른 회귀 모의 모형의 매개변수 추정 방법을 개발하였으며, 시범 유역을 대상으로 개발된 모형의 적용성을 평가하였다. 오염부하량 모의를 위한 회귀모형으로, T-N (Total-Nitrogen)은 LOADEST의 5번 회귀모형을, T-P (Total-Phosphorous)는 3번 회귀모형을 선택하였다. 모의결과, T-N, T-P 모두 선택된 회귀모형이 실측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 두 물질 모두 오염부하량이 과소 모의되어 실측치와 편차가 발생하는 것으로 나타나, 분위사상법을 이용하여 모의치의 편의보정을 실시하였다. 보정결과, 모형의 정확도는 크게 변하지 않았으며, 오염부하량이 과소 모의 되는 경향이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 미계측 유역에서 회귀모형 매개변수 추정을 위해, 다중회귀분석을 이용하였으며, 81개 유역의 최적 매개변수와 유역특성 자료를 이용하여 매개변수 추정방법을 개발하였다. 개발된 두 방법을 이용하여, 매개변수를 추정하고, 오염부하량을 모의한 결과, 두 방법 모두 실측치를 잘 반영하여 모의할 수 있는 것으로 나타났으며, 최적 매개변수에 의한 모의치와 유사한 모의능력을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 매개변수 추정방법은 실측자료가 확보되지 않은 농업용 저수지 소유역에 대한 오염부하량 모의와 정책결정을 위한 스크린 모델로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 농업용수 공급량, 필요수량, 관계효율, 민감도 분석, 모형의 평가

* 서울대학교 지역시스템공학전공 연구원 (e-mail: lku0019@naver.com)
Researcher, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

13. 농촌용수 물순환 해석모형의 프레임웍 설계 (학술발표)

<p>농촌용수 물순환 해석모형의 프레임웍 설계</p> <p>Framework of an Object-Oriented Modeling System for the Rural Water Resources Assesment</p> <p>강문성*, 송인홍**, 박지훈***, 송정현****, 김진택*****</p> <p>Moonseong Kang, Inhong Song, Jihoon Park, Junghun Song, Jintaek Kim</p>
<p>요 지</p> <p>농촌용수의 복잡성과 광범위성을 보다 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 독립적인 객체로 모듈화하고, 조건에 맞게 다수의 모듈을 조합하여 해석할 수 있는 객체지향 모델링 기법 기반의 맞춤형 모델 시스템 구축이 필요하다. 본 연구의 목적은 우리나라 농촌지역의 물리적 특성 및 영농의 다양화/복합화에 따른 농촌용수구역단위의 종합적인 농촌용수 물순환 해석을 위하여, 1) 기존의 국내외 물순환 해석 모듈 및 시스템을 고찰하고, 2) 종합적 농촌용수 해석 모형의 개발 필요성에 대한 전문가 설문 조사를 실시하여 분석하며, 3) 이를 바탕으로 종합적 농촌용수 해석 모형을 위한 프레임웍을 개발하는 데 있다. 농촌용수 해석 통합시스템 개발은 기상, 토양, 작물, 산림, 농학, 수리/수문, 수질, 수리시설, 프로그램 등을 포함하는 광범위한 연구 분야가 포함되어야 함으로 단기적 관점에서 수행될 수 있는 연구 사업으로는 한계가 있다. 따라서, 각 학문 분야별 전문가그룹을 통섭하고, 국가적 차원의 중·장기적인 관점에서 종합적/체계적 계획을 수립하여 추진해야 할 것이다. 본 연구의 결과는 우리나라 농촌지역 특성 및 기후변화를 고려한 수자원의 물요소분석 등의 이수 및 홍수 등의 치수에 대한 전방위 대처를 통한 농촌수자원의 안정적인 공급과 국가 청정 수자원 확보를 위한 적정 농촌물순환 해석 기술 제공 및 활용이 기대된다.</p>
<p>핵심용어 : 농촌용수; 물순환; 모형; 프레임웍; 객체지향</p>


14. 객체지향 모델링 기법 기반의 농촌용수 물순환 해석 시스템 설계 (학술발표)

<p>객체지향 모델링 기법 기반의 농촌용수 물순환 해석 시스템 설계</p> <p>Object-oriented Modeling Approach for the Rural Water Resources Assesment</p> <p>송정현*, 강문성**, 송인홍***, 박지훈****, 안지현***** 김진택*</p> <p>Jung Hun Song, Moon Seong Kang, Inhong Song, Ji Hoon Park, Ji Hyun An, Jin Taek Kim</p>
<p>요 지</p> <p>우리나라 농촌지역은 기상, 작물, 토양 등의 물리적 요소와 영농 등의 인위적 요소에 따라 수문순환이 복잡하다. 농촌용수의 복잡성을 고려하여 물순환을 효율적으로 해석하기 위해서는 농촌용수의 다양한 모의 요소를 각각의 독립적인 객체 모듈로 구성하고, 모듈을 연계하여 종합적으로 해석하는 객체지향 모델링 기법 기반의 통합 시스템의 구축이 필요하다. 본 연구의 목적은 농촌용수 물순환의 효율적인 해석을 위한 객체지향 모델링 기법 기반의 해석 시스템을 설계하는 데 있다. 개발된 시스템은 농촌용역을 저수지 상류 유역, 저수지, 저수지 하류 유역으로 구분하여, 각 지역을 독립적 또는 종합적으로 해석할 수 있도록 구성하였다. 모듈 간 연계기술은 농촌용수 모의 요소별 해석 기술을 정립하여 모듈로 구성하여 개발하였다. 기상 등의 관측 자료는 데이터베이스로 구축하여 모듈의 입력 자료로 연계·이용되도록 구성하여 사용자의 입력 자료 구축이 용이하도록 구성하였다. 또한, 본 시스템은 사용자가 해석 기술을 선택적으로 사용할 수 있도록 구성하였으며, 모듈의 예측 결과를 시각적으로 나타내어 사용자의 의사결정에 활용될 수 있도록 구성하였다. 본 연구의 결과는 전국적으로 분포하는 농촌용수구역별 물순환 해석 자료로 활용하여 농촌용수 관리 선진화에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.</p>
<p>핵심용어 : 농촌용수, 물순환, 객체지향, 의사결정, 모델링</p>


15. 미계측 유역의 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발 (학술발표)

<p>미계측 유역의 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발 Development of Regression Equations for the Parameter Estimation of TANK model</p> <p>안지현*, 강문성**, 송인홍***, 송정현**** Ji Hyun An, Moon Seong Kang, In Hong Song, Jung Hun Song</p> <hr/> <p>요 지</p> <p>하천이나 유역의 수자원을 보다 합리적으로 이용하고 관리하기 위해서는 정확한 유출량의 추정이 요구된다. 우리나라는 일 유출량 모의에 있어서 이론이 단순하고 다른 모형에 비하여 입력자료 수가 적어 사용이 용이한 TANK 모형을 주로 이용하고 있다. 장기유출모형의 모의 결과는 매개변수에 따라 많은 영향을 받기 때문에 적절한 매개변수를 사용하는 것이 중요하다. TANK 모형의 매개변수는 일반적으로 관측 자료를 이용한 모형의 보정을 통해 추정할 수 있으나, 우리나라의 많은 소유역의 경우 관측 자료가 거의 존재하지 않아 매개변수 추정에 어려움이 많다. 따라서, 미계측 유역에서 TANK 모형 매개변수를 추정하기 위한 일반화된 방법이 필요하다.</p> <p>본 연구의 목적은 우리나라에 위치한 미계측 소유역을 대상으로 일 유출량 추정을 위한 TANK 모형의 매개변수를 결정하는 회귀식을 개발하는 데 있다. TANK 모형의 매개변수는 수문계측 자료를 보유하고 있는 유역을 대상으로 최적화 기법을 이용하여 보정하였으며, 매개변수와 유역특성 사이의 상관성을 분석하여 일반화된 회귀식을 개발하였다. 또한, 본 연구에서는 최적화 기법과 개발된 회귀식에 기반한 일 유출량 예측 TANK 모형을 구성하고 그 적용성을 검토하였다. 본 연구결과는 미계측 유역의 일 유출량 추정을 위한 일반화된 방법론을 제공할 수 있을 것으로 사료된다.</p> <p>핵심용어 : TANK 모형, 매개변수 최적화, 유출량, 회귀식</p>
--

16. Modeling surface drainage in paddy block area considering agricultural water supply (학술발표)

 <p>2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA 269.429.0300 fax 269.429.3852 hq@asabe.org www.asabe.org</p>	<p>An ASABE Meeting Presentation Paper Number: 131620920</p>
<h3>Modeling Surface Drainage in Paddy Block Area Considering Agricultural Water Supply</h3>	
<p>JungHun Song, Graduated student Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, sjh8665@naver.com</p>	
<p>MoonSeong Kang, Associate Professor, PhD Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3212 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, mskang@snu.ac.kr</p>	
<p>InHong Song, Research Professor, PhD Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, inhongs@snu.ac.kr</p>	
<p>JeongRyeol Jang, PhD Saemangeum Research, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870, Hae-an-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea, jeongryeol.jang@gmail.com</p>	
<p>JinTaek Kim, PhD Rural Research, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870, Hae-an-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea, dr_kim@hanmail.net</p>	

17. Modification of generalized method for the parameter estimation of the TANK model in ungauged watersheds (학술발표)



2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA
269.429.0300 fax 269.429.3852 hq@asabe.org www.asabe.org

An ASABE Meeting Presentation

Paper Number: 131620249

Modification of Generalized Method for the Parameter Estimation of the TANK model in Ungauged Watersheds

JiHyun An, Graduate student
Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, ajh11@snu.ac.kr

MoonSeong Kang, Associate Professor, PhD
Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3212 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, mskang@snu.ac.kr

InHong Song, Research Professor, PhD
Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, crisis01@snu.ac.kr

JungHun Song, Graduated student
Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, sjh8665@naver.com

JeongRyeol Jang, PhD
Saemangeum Research, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870, Hae-an-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea, jeongryeol.jang@gmail.com

JinTaek Kim, PhD
Rural Research, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870, Hae-an-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea, dr_kim@hanmail.net

18. SWAT 모형과 TANK 모형을 이용한 댐 유역의 유출량 모의 (학술발표)

SWAT 모형과 TANK 모형을 이용한 댐 유역의 유출량 모의
Runoff Simulation in a Dam Watershed Using SWAT and TANK Model

김계웅*, 강문성**, 송인홍***, 안지현****, 박지훈*****, 송정현*

Kyeung Kim, Moon Seong Kang, Inhong Song, JiHyun Ahn, Jihoon Park, JungHun Song

요 지

강우-유출 과정은 복잡하고 시-공간적 변동이 심하며 비선형성을 포함한다는 특징이 있다. 이러한 강우-유출의 모의를 위해 다양한 모형이 개발되어 왔으며, 과거 모형에 비해 점차 복잡해지는 추세이다. 하지만, 모형의 구조가 간단한 집중형 모형이 복잡한 모형에 비해 모의 능력이 좋지 않다고 할 수는 없으며, 대상지역, 환경조건, 적용목적 등에 따라 적절히 이용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 모형의 유형에 따른 장단점을 분석하기 위해서 준분포형 모형인 SWAT(Soil & Water Assessment Tool) 모형과 집중형 모형인 TANK 모형을 댐유역을 대상으로 모의하여 비교·평가하고자 한다. 대상지역은 4개의 댐유역을 선정하였으며 모형의 구동을 위해 필요한 입력자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)의 수문자료와 지형자료(토지이용도, 토양도, 수치표고자료 등)를 이용하여 구축하였다. 모형의 보정을 위한 유출자료는 국가수자원관리 종합정보시스템에서 제공하는 2007년부터 2009년까지의 3개년 자료를 이용하였다. SWAT 모형의 매개변수는 ArcSWAT내의 Auto-Calibration 기능을 이용하여 보정하였으며 TANK 모형의 보정은 유전자알고리즘(Generic Algorithm)을 이용하여 2007년부터 2009년까지의 3개년 자료를 학습시킴으로써 실시하였다. 모형의 검증은 2010년부터 2012년의 자료를 이용하여 실시하였다. 본 연구의 결과는 집중형 모형과 준분포형 모형에 대한 이해를 넓히고 강우-유출 모의를 위한 모형 선정에 있어 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 장기유출량, SWAT, TANK, 집중형 모형, 분포형 모형

19. 농촌용수구역 수문 해석기법의 개선 (학술발표)

농촌용수구역 수문 해석기법의 개선

Improvement of hydrologic analysis for agricultural irrigation district in South Korea

송정현*, 강문성**, 송인홍***, 안지현****, 전상민*****

JungHun Song, MoonSeong Kang, Inhong Song, An JiHyun, Jun Sangmin

요 지

우리나라 농업유역은 논, 밭 등의 농작물의 재배활동이 이루어지는 생산 공간과 산림 및 주거지 등으로 구성되어 있으며, 작물의 생육에 필요한 물을 인위적으로 공급하기 위한 농업용 저수지 등의 수리시설물이 위치하고 있다. 국외에서 개발된 농업유역 모형은 우리나라의 기상, 토양, 작물, 지형, 기후, 토지이용 등 환경조건이 상이한 조건에서 개발된 모형들로서, 우리나라 환경조건이 가지는 특징을 반영하는데 한계가 있다. 국내에서는 농촌용수구역 수문 해석을 위해 HOMWRS (Hydrologic Operation Model for Water Resources System) 모형을 주로 적용하고 있으나, HOMWRS 모형은 농업용수 공급량, 저수지 수위, 관개지구 배수량 등의 모의 요소에 대한 해석 기법의 한계가 지적되고 있다. 본 연구에서는 농촌용수구역 수문순환의 효율적 해석을 위하여, HOMWRS 모형의 모의 기법 중 한계로 지적되어 왔던 저수지 유입량 모의, 농업용수 공급량 모의, 저수지 수위 모의, 관개지구 배수량 모의에 대해 개선하고자 한다. 우리나라 농촌용수구역은 관개지구의 수문 순환과 저수지 상류유역의 수문 순환이 연계되어 복합적으로 발생하며, 저수지 상류유역, 수리시설물 (농업용 저수지), 저수지 하류 관개지구로 구분된다. 저수지 상류유역의 유출량은 수정 3단 TANK 모형을 이용하며, 기 개발된 회귀식을 수정하였다. 농업용수 공급량은 중간낙수 시기에 관개기 중단되는 것으로 수정하였고, 최근 모의 과정에서 대량생산된 것을 사서 쓰는 추세를 반영하여 못자리 용수량을 생략하였다. 또한, 실제 농업용 저수지의 방류는 이양기 이전인 4월부터 시작하는 것을 고려하였다. 저수지 수위 모의는 물수지식 기반 연속방정식을 이용하였으며, 실제 현장에서 홍수조절 용량 확보를 위해 제한수위를 설정하여 유지하는 것을 고려하여, 홍수기에 제한수위 이상의 수위는 강제 방류시키도록 구성하였다. HOMWRS 모형은 관개지구의 배수량은 모의가 불가하며, 관개지구 배수량을 논 포장 배수량과 용수로 배수량 (배분관리 용수량)으로 구분하여 모의가 되도록 구성하였다. 논 포장 배수량은 논 물수지식으로, 용수로 배수량의 농업용수 공급량에 대한 비로부터 산정하였다. 본 연구 결과는 농촌용수구역의 수문 순환에 대한 전반적인 이해를 넓히며, 농촌용수 관리 선진화에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

20. TANK 모형의 매개변수 최적화 기법 비교·분석 (학술발표)

TANK 모형의 매개변수 최적화 기법 비교·분석

Comparison of Optimization Technique for the Calibration of TANK Model Parameter

김계웅*, 강문성**, 송인홍***, 송정현****, 박지훈*****

Kyeung Kim, Moon Seong Kang, Inhong Song, JungHun Song Jihoon Park

요 지


최근 강우-유출모형은 이전보다 구조가 복잡해지고 있으며 이에 따라 모형에 필요한 매개변수 또한 늘어나고 있다. 유역특성을 반영한 신뢰성 있는 매개변수를 얻기 위해서는 매개변수 보정이 필수적이며 보정방법으로는 시행착오법, 최적화기법이 사용되고 있다. 최근에는 많은 매개변수를 객관적이고 짧은 시간 안에 보정하기 위하여 여러 최적화기법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 최적화기법에 따른 수문모형의 매개변수 산정 결과를 비교하기 위하여 유전자알고리즘과 SCE-UA 기법을 이용하여 TANK 모형의 매개변수를 산정하고 이를 비교·평가하고자 한다. 본 연구의 대상지구로는 4개의 댐 유역을 선정하였으며 모형의 입력자료 및 보정에 필요한 유출량 실측자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)의 수문자료를 이용하여 구축하였다. 최적화기법의 적용을 위한 알고리즘 구축은 MATLAB을 이용하였으며 목적함수로는 RMSE, R^2 , EI 등을 이용하였다. 본 연구의 결과는 수문모형의 보정기법에 대한 이해를 넓히고, 매개변수 보정에 필요한 최적화 기법 선정을 위한 기초자료를 제공할 것을 기대한다.

핵심용어 : 최적화기법, 유전자알고리즘, SCE-UA, 수문모형, TANK

21. 홍수기 제한수위를 고려한 농업용 저수지 물수지 분석 (학술발표)

<p>홍수기 제한수위를 고려한 농업용 저수지 물수지 분석 Modeling Water Balance of Agricultural Reservoirs Considering Flood Limited Level</p> <p>송정현*, 강문성**, 송인홍***, 전상민**** Jung Hun Song, Moon Seong Kang, Inhong Song, Sang Min Jun</p> <hr/> <p>요 지</p> <p>우리나라는 2007년 기준 수자원 이용량의 약 62%인 159억톤을 농업용수로 이용하고 있으며, 논 용수량은 2011년 기준 전체 논벼 면적 중 약 80%가 수리시설물을 통해 공급받고 있다. 우리나라 농업용 저수지는 논벼 관개를 위해 단일목적으로 건설되었으나, 최근에는 농업기반시설관리규정에 따라 홍수기 제한수위를 운영하여 홍수에 대비한 조치를 취하도록 설정되어 있다. 홍수기 제한수위 운영은 홍수기에 저수지 수위를 만수위보다 낮게 유지하는 것으로, 이는 저수지 하류 유역의 유출량 변화에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 홍수기 제한수위 운영 전과 후에 따른 농업용 저수지의 물수지 요소 변화를 비교하고 분석하고자 한다. 저수지 유입량은 수정 3단 TANK 모형과 매개변수 지역화식을 이용하여 모의하며, 농업용수 공급량은 논의 물수지식과 관개효율을 고려하여 모의하도록 구성하였다. 저수지 운영규칙은 관개기에는 농업용수를 공급하며, 홍수기에는 제한수위 이상의 수위는 강제 방류되도록 구성하였다. 대상저수지로 홍수기 제한수위가 운영되고 있는 고평, 탑정, 고삼, 청천, 도천, 서성 저수지를 선정하였으며 유역 특성, 관개지구 특성, 저</p>
--

22. The applicability of TANK Model for ungauged watersheds by comparing with SWAT Model (학술발표)

 <p>2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA 269.429.0300 fax 269.429.3852 hq@asabe.org www.asabe.org</p>	<p>An ASABE Meeting Presentation Paper Number:</p>
<p>The Applicability of Tank Model for ungauged watersheds by comparing with SWAT Model</p>	
<p>Kyeong Kim, Graduated student - Presenter Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, kku0019@naver.com</p>	
<p>MoonSeong Kang, Associate Professor, PhD Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3212 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, mskang@snu.ac.kr</p>	
<p>InHong Song, Research Professor, PhD Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, inhongs@snu.ac.kr</p>	
<p>JiHyun Ahn, Research Fellow Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, ajh11@snu.ac.kr</p>	
<p>Jihoon Park, Graduated student Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, gtjihoon@naver.com</p>	
<p>JungHun Song, Graduated student Dept. of Rural systems Engineering, Seoul National University, 200-3210 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea, sjh8665@naver.com</p>	

23. 저수지 하류의 유량 모의를 위한 하천망 모형의 보정 및 검정 (학술발표)

<p>저수지 하류의 유량 모의를 위한 하천망 모형의 보정 및 검정 Calibration and Validation of a Streamflow Network Model for Predicting discharge on a Downstream River of a Reservoir</p> <p>송정현*, 강문성**, 송인홍*** Jung Hun Song, Moon Seong Kang, Inhong Song</p>
<p>요 지</p> <p>농업용 저수지의 하류유역은 저수지로부터 농업용수를 공급받는 관개지구와 산림지 등 관개를 실시하지 않는 비관개지구의 수문순환이 복합적으로 연계된다. 이러한 저수지 하류유역의 하천유량은 배후 유역에서 발생하는 유역 유출량, 관개지구의 농업용수 회귀수량, 저수지에서 방류되는 환경용수 방류량과 제한수위 및 만수위 방류량, 그리고 지하수 유출량 등으로 구성된다. 본 연구에서는 저수지 하류의 하천유량 구성 요소를 해석하는 하천망 모형을 구성하였고, 대상지구의 자료를 구축하였으며, 모형의 보정 및 검정을 수행하였다. 비관개지구의 유출량 모의는 수경 3단 Tank 모형을 이용하였다. 관개지구의 배수량은 논 포장 배수량과 용수로 배수량을 구분하여 모의하며, 논 포장 배수량은 논 물수지식을 기반으로 모의하였다. 저수지 방류량은 저수지 유입량과 저수지 운영방식을 고려하여 모의하도록 구성하였다. 하도 추적은 Muskingum 방법을 이용하였다. 연구 대상지로 이동저수지 유역을 선정하여 기상, 지형, 수문, 그리고 영농 자료를 수집하여 모형의 입력 자료를 구축하였다. 모형의 평가를 위한 통계적 지표는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), root mean square error-observations standard deviation ratio (RSR), 그리고 percent bias (PBIAS)를 이용하였다. 보정 및 검정 결과 구성된 모형의 모의 결과는 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 우리나라 농촌유역 물순환에 대한 이해를 넓히며, 저수지 하류유역 유량 해석을 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.</p> <p>핵심용어 : 하천유량, 유출량, 저수지 방류량, 관개지구 배수량, 농업유역</p>

24. 농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 시스템 개발 (학술발표)

<p>농촌유역 물순환 해석을 위한 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 시스템 개발 Web-Based Data Preprocessing and Model Linkage System for Agricultural Water-Resource Management</p> <p>박지훈*, 강문성**, 송인홍***, 송정현**** Jihoon Park, Moon Seong Kang, Inhong Song, Jung-Hun Song</p>
<p>요 지</p> <p>농촌유역의 물순환 해석은 기후변화, 사회/경제적 변화, 유역환경변화 등의 복잡한 상호작용과 불확실성을 수반한 다양한 형태로 발현하고 있다. 효율적인 농촌유역 수자원 관리를 위해서는 농촌유역에 적합한 데이터베이스를 설계하여 농업생산기반시설, 유역 특성, 기상 및 수문 자료, 기후변화 자료를 각각 구축하고, 외부 환경의 일회성 평가에 기반을 두어 수행되었던 과거의 접근 방법에서 나아가 내외부의 복합적인 환경변화를 능동적으로 반영하기 위한 요소 모듈 방식의 지능형 관리기법의 개발이 필요하다. 본 연구의 목적은 농촌유역 물순환 해석을 위해 필요한 자료를 효율적으로 가공 및 사용할 수 있는 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 시스템을 개발하는데 있다. 농촌유역 물순환 해석을 위해 농촌유역 데이터베이스 설계, 농업생산기반시설 인벤토리 구축, 유역 물리특성/기상/수문 등의 데이터베이스 구축, 기후변화 자료를 구축하고 이를 웹으로 구현하여 물순환 해석 시스템을 개발하였다. 본 연구는 농촌유역 물순환 해석을 위한 자료 전처리 및 모형 연계 시스템을 개발함으로써 지능형 물순환 해석 및 관리 시스템을 개발하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.</p> <p>핵심용어 : 농촌유역, 물순환 해석, 웹기반, 자료 전처리, 모형 연계</p>

25. 유역특성을 고려한 오염부하량 모의 회귀식 개발 (학술발표)

유역특성을 고려한 오염부하량 모의 회귀식 개발

Regression models for pollution loads considering watershed characteristics

김계웅*, 강문성**, 송인홍***, 송정현****, 전상민*****

Kyeung Kim, Moon Seong Kang, Inhong Song, JungHun Song, SangMin Jun

요 지

현재 우리나라는 점오염원 관리로 인한 수질개선 효과가 한계에 다다르고 있으며, 비점오염원의 수계별 총부하 기여율이 지속적으로 증가하고 있어 추가적인 수질개선을 위해서는 비점오염원에 의한 오염부하량을 예측하고 관리하는 것이 필요하다. 국내에서는 비점오염원 관리를 위해 지속적으로 수질 모니터링을 실시하고 있으나 자료수가 부족하고 실측자료가 일부 존재하는 등의 단점을 가지고 있다. 부족한 자료는 환경부에서 제안한 원단위법 또는 분포형 수문모형을 이용하여 모의하고 있으나 원단위법은 유역특성을 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있으며 분포형 수문모형은 모의에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 유역특성을 고려하여 오염부하량을 산정하는 회귀식을 개발하고 적용성을 검토해보고자 한다. 회귀식 개발에 필요한 입력자료는 환경부 물환경정보시스템 (Water Information System, WIS)에서 제공하는 수질자료, 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Resource Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 수위-유량 자료, 용인시 백암면 일대에서 2013년부터 2014년까지 모니터링한 수질 및 유량자료를 이용하였다. 회귀식 도출에는 IBM SPSS Statistics 20 (SPSS, Inc, 2011)을 이용하였다. 개발된 회귀식 검토를 위해 미계측 유역을 대상으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 오염부하량을 모의하였으며, 결과 비교를 통해 개발된 식의 타당성을 검토하였다. 본 연구의 결과는 유역에서 비점오염원에 의해 발생하는 오염부하량 모의를 통해 유역 내 비점오염원 저감대책 마련에 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 비점오염, 오염부하량, 회귀식, SWAT

제 3 절 정책자료

1. 수자원장기종합계획에 적용되는 농업용수 회귀율 산정 개선 방안 제안

처리기관	국토교통부 수자원정책국 수자원정책과		
담당자	김재돈	연락처	044-201-3596
제안접수번호	2AB-1504-001474	접수일	2015-04-06 16:10:15
처리에정일	2015-05-05 23:59:59 (접수일로부터 1개월 이내이거나 의견조회(조사) 등을 실시할 경우 처리기간이 연장될 수 있습니다)		
처리일	2015-04-27 16:51:47		
처리결과	답변완료		
답변내용	<p>정확한 농업용수 회귀율의 산정을 위해서는 기상조건, 수원 공별 물관리 방법의 변화, 생육시기별 침투량 등 종합적인 요인들을 고려한 장기적인 조사·분석 연구가 선행되어야 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료됨에 따라 향후 지속적인 연구의 추진 방안을 검토할 계획임을 알려드립니다.</p> <p>참고로 제안하신 사항은 중장기계획수립시 수립과정상의 문제점을 개선요구하시는 것으로 제도를 개선하는 것은 아니어서 불채택되었음을 알려드립니다.</p>		

2. 농업수자원 모델링 분야의 지속적/장기적 추진 및 지원

처리기관	농림축산식품부 농업정책국 식량정책관 농업기반과		
담당자	이경철	연락처	044-201-1856
제안접수번호	2AB-1506-005046	접수일	2015-06-18 09:31:50
처리에정일	2015-07-17 23:59:59 (접수일로부터 1개월 이내이거나 의견조회(조사) 등을 실시할 경우 처리기간이 연장될 수 있습니다)		
처리일	2015-07-17 11:12:55		
처리결과	답변완료		
답변내용	<p>안녕하십니까? 평소 농업·농촌 발전에 관심을 가져주셔서 감사드리며, 귀하께서 국민신문고에 접수하신 '농업수자원 모델링 분야의 지속적, 장기적 추진 및 지원' 관련 제안(신청번호 1AB-1506-004592)에 대하여 답변 드립니다.</p> <p>귀하의 제안 내용을 검토한 결과 기후변화에 따른 안정적인 농촌용수 공급을 위해 농업수자원 모델링 분야에 대한 지속적, 장기적 지원을 제안한 것으로 파악되었습니다.</p> <p>우리부에서는 농어촌정비법 제15조에 따라 농어촌용수의 효율적인 개발·이용 및 보전을 위한 합리화계획을 수립하여 개발여건과 지역특성을 감안한 지역별 10개년 개발계획을 추진하고 있으며, 관개효율 및 재해대처 능력향상 등을 위한 농업용수관리 자동화사업(TM/TC), 전국 농업용수원의 수질현황 및 수질변화 등 수질관리를 위해 농업용수 수질조사 및 수질개선사업을 지속적으로 추진하고 있습니다.</p> <p>본 민원의 답변 내용에 대한 추가적인 설명이 필요한 경우에는 농식품부 농업기반과 이경철 주무관(☎ 044-201-1856, e-mail : lk0072@korea.kr)에게 문의하여 주시면 친절히 안내해 드리도록 하겠습니다. 감사합니다.</p>		

제 4 절 홍보실적

1. 최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개



□□□ **특 집**

최적화 기법을 이용한 수문모형의 매개변수 보정방법 소개

- MATLAB 프로그램을 중심으로 -



송 정 현
서울대학교 / 박사과정
songjh65@gmail.com



정 건 희
호서대학교 / 조교수
gunhuic@gmail.com



강 문 성
서울대학교 / 부교수
mskang@snu.ac.kr

1. 서언

수문모형은 다양한 공간적 규모에 대한 수문순환 등을 모의하기 위해 개발되어 왔으며, 구동을 위해서는 매개변수에 대한 이해 및 적적할 입력 자료의 구축이 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 수문모형을 통해 수문순환을 정확하게 모의하기 위해서는 유역의 특성과 주요 매개변수를 물리적 범위에 근거하여 선정할 필요가 있다. 이를 위해 주요 매개변수 선정을 위한 모형의 보정이 필요하며, 모형의 매개변수 최적화를 위한 무수히 많은 방법들이 개발되어 사용되어지고 있다.

최적화 이론은 모든 가능한 대안에 대해 일일이 계산

하고 평가해 보지 않고도 최선의 대안을 찾아내기 위한 수치계산방법이라 할 수 있다. 최적화이론은 본래 Operations Research (OR)에서 유래되었으며, OR은 과학적인 방법·수법·기법 등을 시스템응용에 관한 문제에 적용하여 의사결정에 대한 계량적 기초 즉, 최적해를 제공하는 과학적 방법이라 정의될 수 있다. 최적화 문제의 일반적인 형태는 결정변수로 표현되는 목적함수를 최대화하거나 최소화하는 형태이다. 수문모형의 경우 매개변수 최적화라고 하며, 결정변수는 최적화하고자 하는 매개변수가 되며, 목적함수는 관측치와 측정값 사이의 오차를 최소화하는 것이 될 수 있다.

최적화 문제는 목적함수와 제약조건식들의 두 중요한

16 ... 전원과 자원, 제56권 제2호, 2014

2. 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개

Rural Resources
+
학술기술기사 | 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개

01

55

농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크 COMFARM 소개

강문성
서울대학교 / 부교수
mskang@snu.ac.kr

송정현
서울대학교 / 박사과정
songjh65@gmail.com

박지훈
서울대학교 / 박사과정
gjihoon@naver.com

송인홍
서울대학교 / 연구교수
inhongs@snu.ac.kr

기우석
취부원 / 고문
keewoosuk@eburin.com

김진택
농이촌연구원 / 수석연구원
jtkim@ekr.or.kr

1. 서 언

수문·수리·수질과 관련된 물순환 해석모형은 다양한 공간적 규모(지점·포장·유역 단위)에 대한 수문순환, 수리학적 거동, 그리고 오염물질 기작 및 이송 과정 등의 자연현상을 수학적으로 표현한 도구이며 지난 수십 년간 다양하게 개발되어져 왔다 (Srivastava et al., 2007; 강문성, 2008; 강문성과 김철겸 2009; 강문성 등, 2012). 이러한 물순환 해석모형은 시·공간적 범위, 유역 특성, 물순환 요소의 모의 기법 등에 따라 서로 다른 수문순환계와 오염물질 운송 기작을 갖고 있다.

물순환 해석모형들의 지속적인 개발과 응용은 지리정보시스템(geographic information system, GIS), 전문가 시스템(export system), 사용자 인터페이스(graphical user interface, GUI), 객체지향 모델링 시스템(object-oriented modeling system, OOM), 원격탐사(remote sensing, RS) 등의 새로운 기술을 수문·수질 모형에 통합하여 사용자 중심의 종합적인 통합 시스템을 개발하는 방향으로 활발히 이루어지고 있다. 이와 더불어 매개변수의 불확실성의 특징을 구명할 수 있는 효율적인 방법에 대한 심도 깊은 연구가 이루어지고 있다(강문성 등, 2012).

한편, 물순환 해석모형의 정확도를 증가시키기 위해서는 여러 가지 물리적인 기작이나 고차원적 요소를 고려하는 것이 필요하지만 이는 모형의 복잡성을 증가시키

- 689 -

제 5 절 인력양성

1. 복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의 모형의 개발

공학석사학위논문

복합영농 관개지구의 일별 배수량 모의
모형의 개발
A Daily Surface Drainage Simulation
Model for Irrigation Districts Consisting
of Paddy and Protected Cultivation

2013년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
송 정 현

2. 유역 경사에 따른 TANK 모형 매개변수 추정을 위한 회귀식 개발

공학석사학위논문

유역 경사에 따른 TANK 모형
매개변수 추정을 위한 회귀식 개발

Development of Regression Equations
for the Parameter Estimation of
TANK model based on Basin Slope

2013년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
안 지 현

3. 농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발

공학석사학위논문

농업용 저수지 용수공급 모의 시스템의 개발
Development of Agricultural Reservoir
Water Supply Simulation System

2014년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
전 상 민

4. 미계측 유역 오염부하량 모의를 위한 LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

공학석사학위논문

미계측 유역 오염부하량 모의를 위한
LOADEST 회귀모형 매개변수 추정

Estimation of LOADEST Coefficient
for Simulating Pollutant Loads
in Ungauged Watersheds

2015년 7월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
김 계 응


제 6 절 단행본 발간 실적

1. 수질모델링의 이해 및 적용





- 이 책은 수문-수리-수질 모형을 처음 접하는 연구자가 각각의 모형을 현행적으로 이해하고 적용이 가능하도록 구성하였으며, 대학원 석사과정의 참고 교재로도 충분히 활용이 가능할 것으로 생각됩니다. - 머리말 후 -
- SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 장기간에 걸친 다양한 토양유실과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사양 및 농도파동현상의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 모형이다. - 2장 후 -
- SWMM(Storm Water Management Model)은 도시유역의 유출유량과 비점오염 부하량을 모의하도록 개발된 모형으로 도시유역 내의 우수로 인해 발생하는 유출유량과 수질을 예측하기 위해 기상학적특성 및 하수관망 시스템의 특성을 모의하도록 되어 있다. - 4장 후 -
- GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management System) 모형은 지표수 및 지하수 거동을 모의하도록 개발된 모형으로서 포장단위의 수질에 미치는 농업관리기작 특성을 평가할 수 있다. - 8장 후 -

수질모델링의 이해 및 적용


강문성 외 17인 공저



서울대학교 지역시스템공학과

서울대학교 지역시스템공학과



제 7 절 수상 실적

1. 복합영농 관개지구의 배수량 모의 모형의 개발



주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농촌용수 물순환 종합해석 모형 기술 개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.